



João Pedro Marques das Neves Carneiro

Licenciatura em Ciências de Engenharia Civil

Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora
Doutora, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Co-orientador: António Santos Silva, Doutor, LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques
Arguente: Prof^a. Doutora Inês Flores-Colen
Vogais: Prof^a. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues
Doutor António Santos Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2012

‘Copyright’ João Pedro Marques das Neves Carneiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus avôs

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a todos os que me ajudaram directamente na realização desta dissertação:

À Professora Doutora Paulina Faria, orientadora da presente dissertação, pelo interesse que sempre mostrou e pelo apoio incansável que prestou, pela disponibilidade total que demonstrou, pela constante transmissão de conhecimentos, pelo rigor que exigiu, e ao mesmo tempo, pela acessibilidade, simpatia e o à-vontade que sempre impôs.

Ao Eng. Vítor Silva, bolseiro da UNL-FCT, por toda a ajuda e orientação prestadas na execução de toda a campanha experimental, assim como pela disponibilidade e apoio que sempre demonstrou ao longo deste trabalho, sem esquecer aqueles divertidos momentos, que acabaram por contribuir para uma melhor relação pessoal e profissional.

Ao Doutor António Santos Silva, co-orientador da presente dissertação, por toda a ajuda prestada em relação à parte experimental desenvolvida no LNEC, por ter estado sempre disponível, pela transmissão de conhecimentos, pelas sugestões e apoio prestados no processo de escrita do trabalho, e por fim, pela acessibilidade e simpatia que sempre demonstrou.

Ao Tiago Branco, companheiro de trabalho ao longo desta dissertação, pelo apoio e disponibilidade que sempre prestou, pelas horas passadas no laboratório do DEC/FCT-UNL, e por todos os momentos que proporcionou pela sua boa disposição que, sem dúvida, facilitou o desenrolar dos trabalhos experimentais.

Ao Doutor André Gameiro, bolseiro do projecto FCT-MEC METACAL, por todo o apoio prestado na realização dos ensaios químicos e mineralógicos, realizados no LNEC.

À Doutora Rosário Veiga, investigadora do projecto FCT-MEC METACAL, pelo apoio prestado em todos os desenvolvimentos experimentais realizados no LNEC.

Aos meus colegas André Bandeira, Carlos Rodrigues, Duarte Mergulhão, João Brito, João Grilo, e Ricardo Vieira, pela ajuda concedida na execução de alguns dos trabalhos experimentais.

Por fim, por esta dissertação encerrar um período árduo, e por vezes nem tanto, da minha vida académica, gostaria de agradecer a algumas pessoas em particular:

Aos meus colegas e amigos Carlos Rodrigues, João Brito, Pedro Barbosa e Tiago Gonçalves por todos os momentos de estudo, de trabalho e de folia que passámos juntos.

À Suzana Cardoso, por ter feito parte de um longo período deste percurso, no qual sempre me apoiou, tendo sido determinante em alguns momentos.

A toda a minha família, com especial atenção para os meus pais, João Manuel E. S. Neves Carneiro e Maria Celeste T. M. Neves Carneiro, por me proporcionarem a possibilidade da realização deste percurso académico e pela paciência, incentivo, apoio e compreensão ao longo do mesmo.

RESUMO

É fundamental definir as características que as argamassas de substituição devem apresentar, de modo a poderem dar resposta às solicitações que se lhes colocam e garantir a compatibilidade necessária com os suportes dos edifícios antigos. A cal hidráulica é o ligante que combina numa única substância a possibilidade de presa hidráulica e de presa aérea, desenvolvendo características que conferem às argamassas modernas propriedades particulares, adequadas para a utilização na tarefa complexa de reabilitar. Em termos energéticos, por serem produzidos a temperaturas de cozedura mais baixas que as necessárias para a produção do cimento e requererem menor energia para moagem, a utilização destes ligantes torna-se uma opção mais conservadora.

A nova versão da norma NP EN 459-1: 2011 de cais de construção apresenta uma nova classificação das cais com propriedades hidráulicas, resultando em cais hidráulicas distintas das que anteriormente eram comercializadas com o mesmo nome e que interessa caracterizar; do mesmo modo também a possível optimização que pode ser alcançada pela utilização de metacaulino na formulação de argamassas com base nestas cais.

A presente dissertação, realizada no âmbito do projecto FCT-MEC METACAL, estuda a caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL5, classificada de acordo com a última revisão da norma, com diferentes teores de metacaulino, tempos de amassadura de referência e mais prolongados, sujeitas a dois tipos de cura distintas – ambas em ambientes com 20°C de temperatura, mas com 90% e 65% de humidade relativa.

As argamassas foram submetidas a ensaios mecânicos, físicos, químicos e mineralógicos, em diferentes idades. Os resultados obtidos demonstraram uma melhoria nas características das argamassas com metacaulino, submetidas a cura húmida (90% de humidade relativa), com destaque para a substituição de 10% do ligante pela mesma quantidade de pozolana. Os diferentes tempos de amassadura não demonstraram ter uma grande influência nas características das argamassas.

PALAVRAS-CHAVE:

Argamassa, reabilitação de edifícios, cal hidráulica natural, pozolana, metacaulino, ensaios, normalização, tempo de mistura, condições de cura.

ABSTRACT

It is essential to define the characteristics that repair mortars should have, so they can meet the demands they face and ensure compatibility, when used on ancient buildings. Natural hydraulic lime is a binder which in a single substance combines the possibility of air and hydraulic hardening, developing characteristics that may give modern mortars suitable properties for use in the complex task of rehabilitation. Energetically speaking, to be produced at temperatures lower than those required for the cement production as well as requiring lower energy for grinding, the use of these binders becomes a more conservative approach.

The new version of the standard NP EN 459-1: 2011 (EN 459:2010) of building limes presents a new classification of limes with hydraulic properties, resulting in natural hydraulic limes different from those that were previously marketed under the same name and that matters to characterize; as also possible optimization that can be achieved by the use of metakaolin in the formulation of mortars based on these binders.

This work, which was conducted under the project FCT-MEC METACAL, studies the characterization of natural hydraulic lime mortars NHL5, classified according to the latest revision of the standard, with different levels of metakaolin and different mixing times, subjected to two distinct kinds of curing conditions - both in environments with 20 ° C, but with 90% and 65% of relative humidity.

The mortars were subjected to mechanical, physical, chemical and mineralogical tests, at different ages. The results showed an improvement in the characteristics of mortars with metakaolin, subjected to humid curing (90% relative humidity), especially for the replacement of 10% weight of the binder by the same amount of pozzolan. The different mixing times did not show a great influence on the characteristics of mortars.

KEYWORD:

Lime Mortar, building rehabilitation, natural hydraulic lime, pozzolan, metakaolin, lab testing, standardization, mixing time, curing conditions.

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	3
2. ESTADO DO CONHECIMENTO.....	4
2.1. MATÉRIAS-PRIMAS.....	4
2.1.1. Cal hidráulica.....	4
2.1.2. Pozolanas.....	5
2.1.3. Agregados.....	7
2.2. ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA.....	7
2.2.1. Características.....	7
2.2.2. Utilização na reabilitação de edifícios.....	8
2.2.3. Argamassas de cal hidráulica e metacaulino.....	9
2.2.4. A sustentabilidade e o factor ambiental.....	11
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	13
3.1. MATERIAIS E ARGAMASSAS PRODUZIDAS.....	13
3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	14
3.2.1. Análise granulométrica.....	14
3.2.2. Baridade.....	16
3.3. AMASSADURAS.....	17
3.3.1. Tempo de amassadura.....	18
3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	18
3.4.1. Determinação da massa volúmica.....	18
3.4.2. Determinação da consistência por espalhamento.....	19
3.5. EXECUÇÃO DOS PROJETOS E CONDIÇÕES DE CURA.....	20
3.5.1. Moldagem, desmoldagem e cura inicial.....	20
3.5.2. Condições de cura.....	21
3.6. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	22
3.6.1. Planeamento dos ensaios.....	22
3.6.2. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	23
3.6.3. Determinação das resistências à tracção por flexão e da resistência à compressão.....	24

3.6.4.	Determinação da absorção de água por capilaridade.....	28
3.6.5.	Determinação da secagem.....	30
3.6.6.	Determinação da porosidade aberta.....	32
3.6.7.	Condutibilidade térmica.....	34
3.6.8.	Determinação da resistência aos sulfatos.....	35
3.6.9.	Ensaio químicos e mineralógicos.....	37
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	40
4.1.	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	40
4.1.1.	Consistência por espalhamento.....	40
4.2.	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	42
4.2.1.	Características mecânicas.....	44
4.2.2.	Absorção de água por capilaridade.....	51
4.2.3.	Secagem.....	57
4.2.4.	Porosidade Aberta.....	62
4.2.5.	Condutibilidade térmica.....	64
4.2.6.	Resistência aos sulfatos.....	66
4.2.7.	Ensaio químicos e mineralógicos.....	70
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	84
5.1.	CONCLUSÕES FINAIS.....	84
5.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	86
	BIBLIOGRAFIA.....	89
	ANEXOS	
	ANEXO I – DADOS CLIMÁTICOS DA SALA DE CURA HÚMIDA.....	93
	ANEXO II – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	96
	ANEXO III – ENSAIOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS.....	107
	ANEXO IV – FICHA TÉCNICA NHL5.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Curvas granulométricas das areias e respectiva mistura.	15
Figura 3.2 - Determinação da consistência por espalhamento: amostra antes e depois de sofrer as 15 quedas.	19
Figura 3.3 – Compactação mecânica e provetes frescos nos moldes.	20
Figura 3.4 – Desmoldagem dos provetes e colocação dentro de sacos de polietileno.	21
Figura 3.5 – Provetes nas salas de cura standard, Sc, e de cura húmida, Hc.....	21
Figura 3.6 - Equipamento para determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico.	24
Figura 3.7 – Observação dos provetes após ensaio de resistência à tracção por flexão com os provetes húmidos no seu interior.....	25
Figura 3.8 – Execução do ensaio de resistência à tracção por flexão na “ZWICK Z050”.	25
Figura 3.9 - Formação de superfície de rotura no ensaio de tracção por flexão.....	26
Figura 3.10 – Formação da superfície de rotura no ensaio de resistência à compressão.....	27
Figura 3.11 – Ajuste manual no ensaio de resistência à tracção no LNEC.	27
Figura 3.12 – Meio provete colocado no aparelho de ensaio de resistência à compressão no LNEC e resultado do mesmo.	28
Figura 3.13 – Preparação dos meios provetes para ensaio de absorção de água por capilaridade aos 90 dias.....	29
Figura 3.14 – Determinação de absorção de água por capilaridade aos 90 dias	30
Figura 3.15 – Balança utilizada e provetes dentro da caixa em contacto com água no ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias de idade.....	30
Figura 3.16 - Ensaio de secagem aos 90 dias.	31
Figura 3.17 – Preparação das amostras para determinação da porosidade aberta aos 90 dias.	32
Figura 3.18 – Determinação da porosidade aberta aos 28 dias: amostras colocadas no exsiccador e após 48h submersas em água.	33
Figura 3.19 – Material utilizado para as pesagens hidrostáticas e amostras no exsiccador a vácuo aos 90 dias.....	34
Figura 3.20 – Sistema (ISOMET e respectiva sonda) utilizado no ensaio de condutibilidade térmica.....	35
Figura 3.21 – Provetes imersos na solução e colocados na estufa depois das 2 horas de imersão.....	37
Figura 3.22 – Provetes de cal aérea (mais claros) e de cal hidráulica ao fim do 2º e 20º ciclo.....	37
Figura 3.23 – Difrakção dos raios X.....	38
Figura 4.1 – Consistência por espalhamento das argamassas	41
Figura 4.2 – Módulo de elasticidade dinâmico de todas as argamassas aos 28 e 90 dias.	44

Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cura standard (Sc) e húmida (Hc), aos 28 e 90 dias.....	45
Figura 4.4 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com tempo de amassadura standard (Sm) e mais prolongado (Lm), aos 28 e 90 dias.	45
Figura 4.5 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com e sem substituição parcial de Mk por NHL, aos 28 e 90 dias.	46
Figura 4.6 – Módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas das argamassas aos 28 dias.....	47
Figura 4.7 – Módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas das argamassas aos 90 dias.....	47
Figura 4.8 – Resistências mecânicas das argamassas aos 28 e 90 dias.	49
Figura 4.9 – Resistências mecânicas das argamassas de cura standard (Sc) e húmida (Hc) aos 28 e 90 dias.....	49
Figura 4.10 – Resistências mecânicas das argamassas com tempo de amassadura longo (Lm) e mais curto (Sm) aos 28 e 90 dias.....	50
Figura 4.11 – Resistências mecânicas das argamassas com diferentes teores de metacaulino, aos 28 e 90 dias.	51
Figura 4.12 – Curvas de absorção de água por capilaridade	52
Figura 4.13 – Fase inicial do ensaio de absorção de água por capilaridade	53
Figura 4.14 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com tempo de mistura standard de curas standard ou húmida, aos 28 e 90 dias.....	54
Figura 4.15 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de cura húmida de mistura curta Sm, ou prolongada Lm, aos 28 e 90 dias	55
Figura 4.16 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas Lm_Hc com diferentes teores de Mk, aos 28 e 90 dias	55
Figura 4.17 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade das argamassas aos 28 e 90 dias.....	56
Figura 4.18 – Curvas de evaporação das argamassas.....	58
Figura 4.19 - Curvas de evaporação das argamassas com tempo de mistura standard Sm e curas standard Sc ou húmida Hc, aos 28 e 90 dias.....	59
Figura 4.20 - Curvas de evaporação das argamassas de cura húmida de mistura curta Sm, ou prolongada Lm, aos 28 e 90 dias	59
Figura 4.21 - Curvas de evaporação das argamassas de mistura longa e cura húmida Lm_Hc com diferentes teores de Mk, aos 28 e 90 dias	60
Figura 4.22 – Índice de secagem das argamassas.....	61
Figura 4.23 – Porosidade aberta das argamassas aos 28 dias.....	62
Figura 4.24 – Porosidade aberta das argamassas aos 90 dias.....	63
Figura 4-25 – Condutibilidade térmica das argamassas	64
Figura 4.26 – Condutibilidade térmica e porosidade aberta das argamassas, aos 28 dias.....	65
Figura 4.27 – Resistência aos sulfatos das argamassas (7º ao 20º ciclo).....	67

Figura 4.28 – Perda de massa das argamassas ao 13º ciclo do ensaio de resistência aos sulfatos.	68
Figura 4.29 – Resistências mecânicas, porosidade aberta e variação de massa das argamassas ao 13º ciclo.....	69
Figura 4.30 – DRX das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 28 dias de idade.....	72
Figura 4.31 - dTG das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 28 dias de idade.	72
Figura 4.32 - DRX das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 90 dias de idade.	73
Figura 4.33 - dTG das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 90 dias de idade	73
.Figura 4.34 – DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 28 dias de idade.....	74
Figura 4.35 - dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 28 dias de idade.	74
Figura 4.36 - DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 90 dias de idade.	75
Figura 4.37 - dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 90 dias de idade.	75
Figura 4.38 – DRX das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 28 dias de idade.....	76
Figura 4.39 – dTG das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 28 dias de idade.....	76
Figura 4.40 - DRX das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 90 dias de idade.	77
Figura 4.41 - dTG das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 90 dias de idade.	77
Figura 4.42 – DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 28 dias de idade.	78
Figura 4.43 – dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 28 dias de idade.....	78
Figura 4.44 - DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 90 dias de idade.	79
Figura 4.45 - dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 90 dias de idade.	79
Figura 4.46 – DRX das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 28 dias de idade.....	81
Figura 4.47 – dTG das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 28 dias de idade.....	81
Figura 4.48 - DRX das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 90 dias de idade.	82
Figura 4.49 - dTG das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 90 dias de idade.	82

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Baridade dos constituintes das argamassas.	17
Quadro 3.2 – Designação das argamassas e quantidade dos constituintes.	20
Quadro 3.3 - Argamassas realizadas, tipos de amassadura e cura e respectivas designações.	22
Quadro 4.1 – Argamassas e suas designações, traços ponderais, relações água/ligante, espalhamento e respectivo desvio-padrão.	40
Quadro 4.2 – Resultados e respectivos desvios-padrão de todos os ensaios realizados a todas as argamassas, aos 28 e 90 dias de idade.	43
Quadro 4.3 – Características mecânicas, aos 90 dias, de argamassas para aplicação em edifícios antigos (com base em Veiga et al., 2010).	48

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Sabe-se que a cal, principalmente a aérea, é o ligante histórico por excelência nas formulações clássicas das argamassas utilizadas ao longo do tempo e, como tal, está presente em elevado número de edifícios (Sequeira et al., 2007).

Com o aparecimento do cimento Portland, a utilização da cal tem caído em desuso, devido às características que o novo ligante veio conferir às argamassas: maiores resistências mecânicas, menor tempo de cura e facilidade de aplicação. Contudo, as argamassas de cimento têm-se mostrado demasiado rígidas para funcionarem como argamassas de substituição, incompatibilizando-se a níveis mecânicos, químicos e físicos com os suportes dos edifícios antigos e chegando, em alguns casos, a acelerar a sua degradação. Deste modo torna-se fundamental definir as características que as argamassas de substituição devem apresentar, de modo a poderem dar resposta às solicitações que se lhes colocam e garantir a compatibilidade necessária com os suportes dos edifícios antigos. Procura-se, assim, incrementar o uso de cal na formulação das argamassas de substituição, permitindo a obtenção de argamassas deformáveis e não muito resistentes, capazes de acompanhar as deformações do suporte, que usualmente é fraco, em edifícios históricos (Faria, 2004), (Penas, 2008).

Nas argamassas de cal aérea a hidraulicidade, quando necessária, era obtida genericamente pela introdução de elementos para reacção pozolânica (Faria, 2004). A cal hidráulica é o ligante que combina numa única substância a possibilidade de presa hidráulica e de presa aérea, desenvolvendo características que conferem às argamassas modernas propriedades particulares, adequadas para a utilização na tarefa complexa de reabilitar. Apesar de, num modo geral, as argamassas só de cal aérea apresentarem melhor compatibilidade com os edifícios antigos, a sua utilização torna-se impossível, em alguns casos, devido à sua presa lenta (produzida exclusivamente por carbonatação do hidróxido de cálcio), recorrendo-se, por vezes, a argamassas hidráulicas com as necessárias condições de compatibilidade mecânica, física e química com as paredes dos edifícios antigos (Sequeira et al., 2007).

A adição de materiais pozolânicos melhora as características mecânicas destas argamassas de cal e contribui para uma maior durabilidade.

O metacaulino é uma pozolana artificial obtida da calcinação de argilas caulínicas num tratamento térmico específico. Segundo a bibliografia é um material que quando adicionado a argamassas de cal, confere-lhes um melhor comportamento mecânico e características de absorção de água adequadas para utilização como argamassas de conservação. Argilas caulínicas estão disponíveis em elevada quantidade em Portugal, especialmente no norte e centro do país, embora com pouca procura. No entanto, um crescente interesse científico no uso de metacaulino em argamassas e betões, com o intuito de se obterem melhorias em resistências mecânicas ou para reduzir as reacções

1. Introdução

alcalis-sílica, juntamente com falta de materiais tradicionalmente pozolânicos como as cinzas volantes e a sílica de fumo, estão a direccionar o sector industrial para a produção de metacaulino (Velosa et al., 2009).

Vários trabalhos têm vindo a ser desenvolvidos relativamente à caracterização de argamassas de cal aérea ou de cimento com pozolanas, mas são poucos os que existem relativos à utilização de pozolanas em argamassas de cal hidráulica natural, nomeadamente utilizando cais hidráulicas naturais portuguesas classificadas de acordo com a nova versão da norma NP EN 459-1: 2011 (IPQ, 2011). No presente estudo foi utilizada uma cal hidráulica natural portuguesa de acordo com a nova versão da norma (IPQ, 2011), que resulta da EN 459-1: 2010, e está actualmente em fase de transição mas entrará em vigor a partir de Julho de 2012 (Faria et al., 2012c). Esta norma redefiniu as diferentes cais com propriedades hidráulicas e, entre elas, as cais hidráulicas naturais.

Dadas as situações climáticas e ambientais em que vivemos, o factor ecológico é fundamental e esse aspecto é também uma das vantagens na utilização da cal hidráulica natural. Actualmente é produzida em Portugal a temperaturas inferiores a 900°C, enquanto para a produção de cimento, a rocha calcária possui (no caso das margas) ou são-lhe adicionadas argilas e a calcinação ocorre a temperaturas de quase o dobro, formando-se clínquer no processo de sinterização. Para além da calcinação, também a moagem do clínquer do cimento é muito mais consumidora de energia que a da cal hidráulica (Faria et al., 2012c).

1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA

Esta dissertação tem como principal objectivo aferir qual a influência da proporção de ligante : pozolana, neste caso cal hidráulica natural NHL5 : metacaulino, na obtenção de melhores resultados a níveis mecânicos, físicos e químicos de argamassas com base em cal hidráulica natural, com o intuito de se obterem argamassas para aplicação essencialmente vocacionada para a reabilitação de edifícios. É também alvo de análise a influência que a humidade relativa tem na cura dessas argamassas, assim como as alterações provocadas por diferentes tempos de amassadura.

O estudo envolve uma campanha experimental onde se irão realizar argamassas com traço volumétrico 1:3, com percentagens crescentes de metacaulino em substituição parcial da cal hidráulica, com diferentes tempos de amassadura e sujeitas a curas distintas. O trabalho desenvolvido em laboratório pode-se diferenciar em 3 fases distintas:

1ª Fase – Caracterização das matérias-primas e definição das quantidades utilizadas nas misturas para as argamassas;

2ª Fase – Execução e caracterização das argamassas no estado fresco;

3ª Fase – Caracterização das argamassas no estado endurecido.

A primeira fase engloba os ensaios de análise granulométrica e da determinação da baridade de modo a caracterizar os materiais utilizados.

Na segunda fase procede-se à execução das argamassas, definindo-se primeiro as quantidades de cada material a utilizar e em que proporções. Tendo em vista a obtenção de uma trabalhabilidade adequada à aplicabilidade das argamassas, é determinada a sua consistência por espalhamento. Nesta fase realizaram-se também os provetes e acondicionaram-se as argamassas nas respectivas curas.

A terceira fase, correspondente à caracterização das argamassas no estado endurecido, prevê a realização dos seguintes ensaios:

- **Ensaaios Mecânicos**
 - Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ed);
 - Resistência à Tração (Rt);
 - Resistência à Compressão (Rc).
- **Ensaaios Físicos e de Durabilidade**
 - Absorção de Água por Capilaridade;
 - Secagem;
 - Porosidade Aberta (Pab);
 - Condutibilidade Térmica;
 - Resistência aos Sulfatos.
- **Ensaaios Químicos e Mineralógicos**
 - Análise por difracção de raios X (DRX);
 - Análise termogravimétrica e de térmica diferencial (ATG-ATD).

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo este capítulo introdutório o primeiro.

No segundo capítulo, do estado do conhecimento, são feitas descrições dos temas abordados, dos conhecimentos existentes acerca do assunto em estudo nesta dissertação, das argamassas, matérias-primas e normalizações existentes.

O terceiro capítulo diz respeito a toda a campanha experimental desenvolvida, onde são identificados os materiais utilizados, descritas as argamassas realizadas e todos os ensaios a que foram sujeitas para a sua caracterização.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos, fazendo-se uma ligação com estudos e conhecimentos existentes para poder chegar a conclusões.

No capítulo quinto apresentam-se as conclusões e sugerem-se desenvolvimentos e estudos futuros.

Por fim, as referências bibliográficas, assim como os anexos são apresentados em capítulos autónomos.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. MATÉRIAS-PRIMAS

2.1.1. CAL HIDRÁULICA

A necessidade de se construir em zonas marítimas e fluviais levou o mundo científico a procurar ligantes capazes de endurecerem debaixo de água. Em 1812, Collet-Descotils, professor francês da École des Mines, de Paris, descobre que a cozedura de calcários siliciosos provoca a dissolução da sílica dos ácidos e a sua combinação com a cal, conferindo-lhe propriedades hidráulicas. Graças a este fenómeno, o engenheiro e cientista francês Vicat, (1786-1861), foi o primeiro a compreender o mecanismo que leva ao endurecimento das cais com pozolanas e dos cimentos. O nível de hidraulicidade será tanto quanto a quantidade de argila presente e dependerá da temperatura de cozedura e do tempo a que a mesma ocorre nessa temperatura (Alvarez et al., 2005), (Faria, 2004).

A pedra calcária com teores de argila (marga) entre 5% e 20%, quando sujeita a temperaturas de cozedura entre os 900° C e os 1200° C, dá origem ao óxido de cálcio e dá-se a combinação da sílica e da alumina da argila com esse óxido de cálcio, em quantidades significativas. Aos produtos formados por estes silicatos e aluminatos designam-se por cais hidráulicas, que quando hidratados, dão origem a produtos que ganham presa tanto na água como ao ar (Faria, 2004).

As cais hidráulicas produzidas pela cozedura, até uma temperatura de 1200°C, de rocha calcária mais ou menos argilosa ou siliciosa, extintas e reduzidas a pó, com ou sem moagem, são designadas por cais hidráulicas naturais (NHL), segundo a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011). Quando misturada com água, a cal hidráulica natural ganha presa em duas fases. Inicialmente é predominantemente hidráulica, onde ocorre a hidratação dos aluminatos e silicatos após a amassadura, e, a longo prazo, produz efeitos a presa aérea por reacção do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente na atmosfera (Sequeira et al., 2007).

A fase hidráulica consiste nas reacções químicas dos silicatos e dos aluminatos com a água, que se transformam em silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, possibilitando a presa da argamassa e, por consequência, o seu ganho de consistência. Nas cais naturais está presente uma certa quantidade de cal livre, na forma de óxido de cálcio, que se transforma em hidróxido de cálcio por extinção com água, dando-se depois a sua carbonatação - processo pelo qual ocorre a transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio. Esta reacção vai provocar a variação da microestrutura das argamassas e um consequente decréscimo da sua porosidade, alterando ainda algumas propriedades físicas, tais como a permeabilidade, a difusão de gases e a capilaridade (Penas, 2008).

Em suma, a cal hidráulica natural é produzida pela selecção de uma marga que, quando aquecida a uma temperatura de 900°C - 1200°C, produz um ligante com porosidade equilibrada, com hidratação inicial seguida de carbonatação lenta, sendo estes os pré-requisitos para uma argamassa de reabilitação compatível (Sequeira et al., 2007).

A cal hidráulica natural produzida em Portugal pela Secil-Martingança e utilizada na formulação das argamassas estudadas nesta dissertação é obtida por cozedura de calcário argiloso, seguida de moagem e classificada na classe de resistência NHL5, de acordo com a nova revisão da norma NP EN 459-1:2011 (IPQ,2011). Para além da NHL5, o grupo Secil também produz a NHL3,5, não se tendo obtido à data da desta dissertação informação da produção em Portugal pelo outro grande fabricante de ligantes, a Cimpor.

2.1.1.1. Normalização actual

A revisão da normalização para as cais de construção, NP 459-1:2011 (IPQ, 2011), que está actualmente em transição mas entrará em vigor a partir de Julho deste ano, resulta da EN 459-1:2010 e faz uma distinção clara entre as cais aéreas e as cais com propriedades hidráulicas. Neste último grupo passam a estabelecer-se três tipos de cais diferentes: as cais hidráulicas naturais (NHL), as cais hidráulicas (HL) e as cais formuladas (FL).

Na normalização anterior classificavam-se como cais hidráulicas naturais, as cais que continham adições hidráulicas, podendo essas serem constituídas por materiais pozolânicos ou hidráulicos apropriados ou reguladores de presa, adicionados até 20% em massa. A redefinição das cais hidráulicas naturais (NHL) que a nova norma veio impor não permite qualquer tipo de adição e é exigido um teor mínimo de hidróxido de cálcio e máximo de sulfato, tornando assim mais rigorosa a constituição das mesmas. A classificação mantém-se e podem ser classificadas de NHL2, NHL3,5 ou NHL5 de acordo com a resistência à compressão mínima registada (em MPa) aos 28 dias. Para as cais hidráulicas naturais ou cais aéreas com adições, de acordo com a EN 459-1:2011 (IPQ, 2011), a designação passa a ser de cais formuladas (FL), enquanto a cal hidráulica (HL) é um ligante constituído por cal e outros materiais como o cimento, escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, filer calcário e outros materiais adequados, dentro dos limites definidos pela norma.

Portugal é um dos únicos países produtores de cais hidráulicas naturais e, com a entrada em vigor da nova versão da norma, algumas cais portuguesas com propriedades hidráulicas anteriormente classificadas como NHL, se não forem objecto de reformulação, passarão a ser classificadas como HL ou como FL; os produtores que pretendam continuar a fornecer cais hidráulicas naturais poderão ter de vir a reformular as suas cais, em termos de matéria-prima e/ou de processo de fabrico. Espera-se que estas novas cais hidráulicas naturais apresentem características melhoradas comparativamente às que antes eram designadas pelo mesmo nome, em termos de características diferenciadas dos restantes ligantes minerais e homogeneidade de qualidade (Faria et al., 2012c), (Faria et al., 2012b).

2.1.2. POZOLANAS

A elaboração de argamassas com propriedades hidráulicas, até aos primórdios do séc. XIX, era feita praticamente recorrendo-se a ligantes formados por pozolanas e cal aérea. A partir dessa data,

2. Estado do conhecimento

com o aparecimento e uso generalizado das cais aéreas e do cimento de Portland, a utilização de pozolanas caiu em esquecimento (Faria, 2004).

As pozolonas definem-se como materiais siliciosos ou sílico-aluminosos, sem um valor cimentício directo, mas que reagem quimicamente, na presença de água, com o hidróxido de cálcio presente na cal (a temperaturas ordinárias) formando compostos com propriedades hidráulicas (Said-Mansour et al., 2011). Para que o material se combine com o hidróxido de cálcio, ou seja, para que se dê a reacção pozolânica, é necessário que a sílica e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade. A reactividade da pozolana está portanto ligada à sua estrutura interna e será tanto maior quanto mais afastado estiver do estado cristalino (Coutinho, 2006).

Relativamente à sua classificação, as pozolonas podem ser associadas a dois grupos distintos: pozolanas naturais e artificiais.

As pozolanas naturais têm origem em rochas vulcânicas geralmente ricas em sílica, que, por si só, detêm propriedades pozolânicas. São materiais que não necessitam de tratamentos especiais e o seu processamento, regra geral, é simples: britagem, moagem e peneiração. As pozolanas naturais derivam do arrefecimento brusco das lavas vulcânicas e posteriormente da sua meteorização que, solidificando rapidamente, ficam no estado amorfo (Coutinho, 2006), (Faria, 2004).

As pozolanas artificiais podem resultar de subprodutos industriais, ou resultam de argilas ou xistos naturais que, à partida, não apresentam quaisquer propriedades pozolânicas, mas quando sujeitas a moagem ou a temperaturas entre 500 e 900 °C adquirem essas mesmas características (Coutinho, 2006), (Velosa, 2006).

Das pozolanas artificiais salienta-se o metacaulino, utilizado no estudo desenvolvido na presente dissertação.

2.1.2.1. Metacaulino

O metacaulino é uma forma ultrafina de pó claro de alumino-silicato derivado da calcinação da argila caulinítica. Calcinação é um termo que se refere ao aquecimento controlado a uma temperatura específica, para se obter um material amorfo, sendo o metacaulino normalmente produzido a temperaturas entre os 600-850 °C, de forma a evitar a formação de mullite. Este processo de activação térmica, ou desidroxilação, leva ao colapso da estrutura cristalina, formando uma fase amorfa e altamente pozolânica. A exposição contínua a temperaturas acima da temperatura de desidroxilação promove a recristalização, forma-se mullite e assim a perda da pozolanicidade (Said-Mansour et al., 2011).

A utilização de metacaulino em betões e argamassas pode permitir obter melhorias na trabalhabilidade e resistências mecânicas; verifica-se uma redução do tempo de endurecimento, assim como uma redução da permeabilidade; obtém-se uma maior durabilidade e permite um controlo da reacção álcali-sílica (Melo & Carneiro, 2010).

Tendo em conta a existência de produção de caulino em Portugal, aliado ao facto de o metacaulino ser um material que contribui para a construção sustentável, factor muito importante no contexto actual, a sua utilização neste trabalho é facilmente justificável, assim como o possível interesse nacional e internacional nos resultados obtidos.

2.1.3. AGREGADOS

Um aspecto importante relativamente aos agregados é a distribuição do tamanho das suas partículas. Através da combinação de vários tipos de agregados é possível obter uma curva otimizada de tamanho de partículas, melhorando a distribuição dos grãos e do preenchimento dos vazios. Agregados com uma distribuição de partículas contínua contribuem para a produção de argamassas com uma inferior quantidade de material cimentício e, como tal, de uma menor necessidade de água, reduzindo, consequentemente, problemas relativos à retracção e fissuração (Melo & Carneiro, 2010).

As areias por serem o material que em maior quantidade está presente nas argamassas, assumem uma grande importância no que diz respeito à estrutura porosa da argamassa endurecida (Rato, 2006).

Existem vários tipos de areia no que diz respeito à sua origem e em Portugal encontram-se areias de rio, de areeiro, ou resultantes da fragmentação de rochas (Felgueiras, 2011). As mais utilizadas são as de origem natural, que resultam da desagregação de rochas mais antigas, podendo ser de sedimentação hidráulica ou eólica. No que diz respeito à sua constituição mineralógica, as areias mais comuns são de origem siliciosa, constituídas maioritariamente por quartzo (Rato, 2006).

A granulometria e a forma das areias também variam e têm uma forte influência no tipo de argamassa que constituírem. É importante a utilização de uma mistura de areias com dimensões mais grossas e mais finas, de modo a garantir um melhor arranjo das partículas, conduzindo a argamassas com melhores resistências mecânicas, compacidade e trabalhabilidade.

2.2. ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA

2.2.1. CARACTERÍSTICAS

De um modo geral, as argamassas de cal hidráulica situam-se entre as argamassas de cimento e as de cal aérea no que diz respeito às suas características, obtendo-se normalmente valores intermédios (Penas, 2008).

As argamassas de cal hidráulica, por apresentarem menores resistências mecânicas comparativamente com as de cimento, quer à compressão, quer à flexão, terão menor propensão para contribuir para a degradação mecânica das alvenarias. Os valores das suas resistências devem ser, no entanto, suficientes para situações em que não se prevejam solicitações muito gravosas de choques, punçoamento ou atrito (Veiga & Carvalho, 1994).

2. Estado do conhecimento

A porosidade das argamassas de cal hidráulica é considerável e como tal, quando em contacto com água, a velocidade de absorção da mesma nos instantes iniciais é bastante elevada, conduzindo a um coeficiente de capilaridade alto (Veiga & Carvalho, 1994). Normalmente observa-se uma melhoria desta característica ao longo da idade, tanto a nível da velocidade com que se dá a absorção inicial, como também em relação à quantidade total de água absorvida por capilaridade – valor assintótico (Penas, 2008).

As argamassas de cal hidráulica apresentam tendencialmente módulos de elasticidade dinâmicos baixos, inferiores aos das argamassas de cimento. Esta característica indica que as argamassas de cal hidráulica apresentam maior deformabilidade, contribuindo para uma melhor capacidade de absorver as tensões internas provocadas pela retracção e pela interacção com o suporte (Veiga & Carvalho, 1994). No entanto, tem-se conhecimento que estes estudos nacionais foram efectuados com cais hidráulicas que actualmente seriam classificadas como HL e não como NHL.

A característica única e inerente às argamassas de cal hidráulica, das duas fases de endurecimento, garante a sua adequabilidade na utilização em revestimentos. Segundo Allen e Ball a reacção de hidratação inicial resulta na formação de uma estrutura de silicato de cálcio hidratado, que confere uma presa inicial. Subsequentemente o hidróxido de cálcio presente reage com o dióxido de carbono atmosférico. O aumento de volume associado com a carbonatação preenche os poros e fissuras superficiais, reduzindo o número de trajectos de difusão e restringindo a difusão do dióxido de carbono para maiores profundidades.

Os mesmos autores fazem referência a um fenómeno de “cura autogénea” característico deste tipo de argamassas, em que, no caso de a argamassa estar totalmente carbonatada, o movimento da humidade através da estrutura pode provocar dissolução e re-precipitação de carbonato de cálcio, contribuindo para uma maior resistência do revestimento (Allen & Ball, 2012).

2.2.2. UTILIZAÇÃO NA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

A escolha adequada de argamassas de substituição é crítica para o sucesso de um processo de reabilitação. A compatibilidade entre a nova argamassa e os componentes originais da alvenaria é muito desejável. Esta compatibilidade reflecte-se em vários aspectos: compatibilidade química entre a argamassa de substituição e os materiais originais da estrutura (fundamentalmente ao nível de juntas em paredes históricas de pedra ou tijolo); compatibilidade física, com especial referência para o processo de solubilidade e de transporte de água; compatibilidade estrutural e mecânica, na medida em que as resistências entre a argamassa original e a de reparação têm de ser similares.

Durante o século XX, na reabilitação de estruturas de alvenaria, houve a tendência de substituir as argamassas de cal por argamassas à base de cimento. No entanto, em diversos casos, ficou bem patente os extensos danos causados à antiga alvenaria, devido à incompatibilidade entre as argamassas à base de cimento com os materiais existentes (Lanas & Alvarez, 2003).

Tendo em conta que o material de reparação não deve ser mais resistente mecanicamente que o material a reparar, a fim de se evitar a introdução de tensões num suporte eventualmente fraco, não é recomendável a utilização de cimento como constituinte principal nas argamassas de reabilitação. De facto, as argamassas à base de cimento mostram um conteúdo elevado de sais solúveis, em particular sulfato de potássio que pode causar estragos em antigas alvenarias de pedra, e no geral constituem um factor potencialmente perigoso para a degradação dos rebocos antigos por cristalização e/ou ciclos de hidratação. As argamassas de cimento são também menos permeáveis que as de cal, impedindo a passagem de humidade do reboco antigo para o exterior, e retendo a água no suporte, em vez de facilitar a sua evaporação. Por fim, as argamassas à base de cimento apresentam valores elevados de resistência à compressão, mas longe de ser favorável, este é uma fonte de problemas. As estruturas de alvenaria mostram algum nível de movimento resultante de efeitos térmicos e de fluência; como tal uma argamassa de reparação deve ser capaz de acomodar movimento, contrariamente ao que caracteriza as argamassas de cimento que, por serem muito fortes, restringem o movimento e levam ao aparecimento de tensões que podem causar degradações na alvenaria original (Alvarez et al., 2005), (Lanas & Alvarez, 2003).

De um modo empírico, as argamassas com comportamento hidráulico têm vindo a ser utilizadas há séculos. Os fenícios utilizaram estas argamassas em Jerusalém (séc. X A.C.). Os gregos adicionaram a terra de Santorini à argamassa de cal aérea e, através deste pó vulcânico, muniram a argamassa de propriedades hidráulicas. Contudo, os romanos alcançaram um maior conhecimento acerca da preparação e aplicação destas argamassas hidráulicas e espalharam o seu uso (Lanas et al., 2004).

A utilização da cal hidráulica nas argamassas de reabilitação proporciona várias vantagens, dado que é detentora de dois tipos de cura (Alvarez et al., 2005) e são, hoje em dia, alvo de análise em laboratório e utilizadas na reparação de alvenarias históricas. Esta pesquisa, tanto em laboratório como in situ, forneceu resultados encorajadores e recomenda o uso de cal hidráulica natural em projectos de reabilitação (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2005). Estes autores utilizaram argamassas de substituição de cal hidráulica para reparação de alvenaria histórica em Creta, Grécia. Segundo os mesmos, após 3 anos de aplicação, não se verificaram quaisquer padrões de degradação e a argamassa aplicada parece ter-se adaptado bem à estrutura original, não apresentando fissuras ou eflorescências. Os mesmos concluem que a compatibilidade química, física e estrutural entre a estrutura original e a argamassa de reparação foi obtida. Assim, a intervenção de reabilitação com o emprego de argamassas de cal hidráulica natural pode ser considerada eficaz.

2.2.3. ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA E METACAULINO

A utilização de argamassas de cal aérea com adições pozolânicas (naturais e artificiais) tem sido extensiva, no passado, para a construção de edifícios históricos e tradicionais. O uso de pozolanas altamente reactivas como adição a argamassas de cal, produz argamassas similares às históricas, que

2. Estado do conhecimento

exibem uma avançada durabilidade a climas severos, a condições elevadas de humidade e apresentam valores altos de resistência mecânica (aquedutos, fundações, pontes, etc.) (Aggelakopoulou et al., 2011).

O uso de metacaulino (MK) como adição pozolânica em argamassas de cal aérea não é novidade e existem vários estudos que o definem como uma boa solução. Os autores gregos referidos (Aggelakopoulou et al., 2011) afirmam que as argamassas de cal/metacaulino por eles estudadas apresentaram valores de resistências mecânicas necessários na reabilitação de alvenarias históricas. Concluíram também que todas as argamassas revelaram propriedades mecânicas comparáveis com materiais estruturais tradicionais.

Outro estudo realizado por autores checos revela que a adição de MK numa percentagem de 20% em substituição da massa de cal foi uma solução com sucesso. Dos resultados que obtiveram são de destacar os seguintes (Vejmelkova et al., 2012):

- Foi alcançado uma melhoria notável dos parâmetros mecânicos comparativamente com a argamassa de cal de referência. Isto pode ser considerado um pré-requisito muito bom para o aumento da durabilidade deste tipo de argamassas em relação às argamassas só de cal.

- A aplicação de MK levou a uma redução do transporte de água. O coeficiente de absorção capilar das argamassas de cal e MK foi aproximadamente 20% menor do que a argamassa de referência, só de cal.

Com os resultados obtidos, pode ser concluído que as argamassas de cal/MK podem fornecer uma vasta gama de aplicação na reabilitação de edifícios históricos no futuro e pode, pelo menos, substituir parcialmente a renovação das argamassas correntes, como uma solução mais barata e igualmente eficiente (Vejmelkova et al., 2012).

No que diz respeito a argamassas de cal hidráulica com adição de metacaulino, a bibliografia existente é muito reduzida e ainda menor com a utilização de cal hidráulica natural portuguesa de acordo com a nova versão da norma (IPQ, 2011). No entanto, de acordo com Faria et al. (2012c), a prescrição do uso deste tipo de argamassas tem sido feita em Caderno de Encargos de obras de reabilitação, onde se encontrou prescrito o uso de argamassa “à base de cal hidráulica e pozolana, isenta de produtos cimentícios”. Nesse documento constava também que o “produto deverá ser fornecido em sacos, pré-doseado” (Faria et al., 2012c). Como tal, importa obter conhecimento das características das argamassas formuladas com estas “novas” cals hidráulicas naturais, da influência das condições de cura neste tipo de cal, dos eventuais benefícios que a adição de pozolanas, em particular do MK, e dos teores a considerar neste tipo de argamassas.

Espera-se que, dadas as características do MK e a pesquisa elaborada, se obtenham valores de resistências mecânicas adequadas à aplicação na reabilitação, um melhor comportamento relativo ao transporte de água e uma maior capacidade de resistir ao ataque de sais, comparativamente às argamassas só de cal hidráulica natural.

2.2.4. A SUSTENTABILIDADE E O FACTOR AMBIENTAL

Está-se a sentir um ressurgimento na utilização de argamassas com base em cal também devido ao aumento da consciencialização dos benefícios ambientais e estruturais a elas associados. A cal é um material versátil que pode ser usado para uma variada gama de aplicações estruturais (fundações, paredes, pavimentos) e estéticas (pinturas e revestimentos). A cal é um material com uma boa trabalhabilidade e durabilidade, com uma porosidade e permeabilidade elevadas, que confere aos edifícios a possibilidade de libertarem, na forma de vapor, a humidade, protegendo as alvenarias dessa humidade e prevenindo a formação de condensações. Temperaturas mais baixas de produção, em comparação com outros ligantes, tais como o cimento Portland, exigem menos combustível e permitem que uma produção em pequena escala ocorra perto de fontes de calcário, reduzindo assim os custos de transporte e a poluição (Edwards et al., 2007).

Uma maior consciência ambiental das vantagens das argamassas de cal em termos de emissões de dióxido de carbono (CO_2) libertado durante o fabrico, e da adsorção do CO_2 durante a carbonatação, é um factor que também promove a sua utilização (Allen & Ball, 2012).

Em termos energéticos, a utilização de cal como ligante de argamassas é mais conservadora, uma vez que estes ligantes são produzidos através de temperaturas de cozedura mais baixas e requerem reduzida ou nenhuma energia para moagem (Faria et al., 2012a). A cal hidráulica natural é produzida actualmente em Portugal a temperaturas semelhantes às utilizadas na produção de cal aérea, isto é, a temperaturas inferiores a 900°C (Faria et al., 2012b). Comparativamente às argamassas de cimento, estas apresentam consumos energéticos bastante mais elevados, uma vez que a sinterização do clínquer ocorre a temperaturas perto do dobro das de produção de cal hidráulica natural, assim como a moagem do clínquer do cimento consome muito mais energia que a da cal hidráulica. Existe também um maior consumo de recursos naturais (água, margas calcárias, transportes) inerentes à produção do cimento (Faria et al., 2012a). A cal hidráulica natural constitui assim um ligante hidráulico mais sustentável comparativamente ao cimento e apresenta, à partida, uma maior compatibilidade com as características dos suportes antigos onde venha a ser aplicada (Faria et al., 2012b).

As pozolanas para argamassas começam a ser objecto de normalização em Portugal (NP 4220:2010) (IPQ, 2010). A sua utilização tem vindo a ser reconhecida como promovendo melhorias técnicas, económicas e ambientais (Faria et al., 2012c). O metacaulino surge como uma boa alternativa aos ligantes, visto que necessita de menos energia para a sua produção, que se traduz na libertação de menos 80 a 90% de CO_2 para atmosfera quando comparado com a produção do cimento Portland. Tendo em conta que a indústria da construção é responsável por 30% das emissões de carbono e consome mais matérias-primas do que qualquer outra actividade económica, a utilização do metacaulino assume particular importância (Massena, 2011).

2. Estado do conhecimento

Acrescentando o facto de que Portugal tem capacidade de produção significativa de matéria-prima adequada à produção de cal hidráulica natural (Faria et al., 2012a) e é um país onde existe muito caulino, é de capital importância o papel que poderá desempenhar na construção sustentável.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

A preparação das argamassas bem como a sua execução foram realizadas, na sua totalidade, nos laboratórios da Secção de Construção e Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (SCH/DEC/FCT-UNL). Todos os procedimentos foram efectuados tendo como base a normalização existente. No entanto, por vezes, por inadequação ou inexistência, não foram seguidas normas de argamassas mas de outros materiais, com base em adaptações definidas e que são apresentadas ao longo do trabalho.

Toda a campanha foi estruturada e planeada pelo orientador da presente dissertação, no âmbito do projecto financiado pela FCT-MEC METACAL e desenvolveu-se ainda com o apoio do Engenheiro Vítor Silva, bolseiro da FCT-UNL e do colega Tiago Branco do MIEC, que paralelamente realizou o mesmo tipo de trabalho experimental no âmbito da sua dissertação que visa o estudo de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino (em substituição parcial do ligante) sujeitas a condições de cura húmida.

Todos os desenvolvimentos experimentais realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tiveram o apoio do Doutor Santos Silva, do Doutor André Gameiro e da Doutora Rosário Veiga, investigadores do projecto METACAL.

3.1. MATERIAIS E ARGAMASSAS PRODUZIDAS

Foram elaboradas dez amassaduras de argamassas, todas elas com o mesmo traço volumétrico de 1:3 (ligante : agregado). Como agregado foi utilizada uma mistura de areias siliciosas lavadas e graduadas da AREIPOR, na proporção de 1:1,5:1,5 de APAS12, APAS20 e APAS30, respectivamente. Como ligante foi utilizada cal hidráulica natural Secil Martingança NHL5 (ficha técnica presente no Anexo IV), com classificação segundo a NP EN 459-1: 2011 (IPQ 2011) e que foi produzida em Junho de 2011. Em algumas argamassas foi introduzida uma determinada percentagem do metacaulino comercial francês Argical M 1200 S da Imerys, substituindo parcialmente massa equivalente de cal hidráulica. Essas percentagens em massa foram introduzidas nas quantidades referentes a 5% (5Mk), 10% (10Mk) e 20% (20Mk).

Foram produzidas 10 argamassas diferentes e para melhor as identificar atribuiu-se a letra J (inicial do autor desta dissertação) seguida de um número, de acordo com a execução cronológica das mesmas, tendo-se realizado assim as argamassas J1 a J10. Os casos de J1, J2 e J3 são argamassas em que o ligante utilizado foi apenas a cal hidráulica, J4 e J5 são argamassas de cal hidráulica com substituição de 10% da sua massa por metacaulino e J6, J7, J8 são argamassas de cal hidráulica com substituição de 5%, 10% e 20% das suas massas por metacaulino, respectivamente.

Para além da influência da presença de metacaulino em substituição parcial de cal hidráulica, foi alvo de análise a influência que as condições de cura e o tempo de amassadura teriam nas

3. Campanha experimental

características das argamassas realizadas. Assim, as 3 primeiras argamassas foram concebidas com o intuito de se averiguar a influência que teriam as diferentes condições de cura e o tipo de amassadura, J4 e J5 variam exactamente também nas condições de cura a que foram sujeitas e com J6, J7 e J8 pretendeu-se caracterizar as diferenças que o aumento da quantidade de metacaulino (em substituição da cal hidráulica, em massa equivalente) traria às características das argamassas.

As argamassas J9 e J10 que não estavam inicialmente previstas são uma repetição exacta das J1 e J2, respectivamente. A repetição destas argamassas deveu-se ao facto de se pretender confirmar valores de espalhamento.

Através da baridade dos materiais secos, o traço volumétrico foi convertido para traço em massa de modo a calcular com precisão as quantidades de cada material necessário para se obter o máximo de provetes, tendo em conta o limite da cuba da misturadora mecânica de laboratório utilizada. Após pesagem, os materiais secos eram homogeneizados manualmente e introduzidos na cuba, onde posteriormente se juntava a água durante os segundos iniciais de amassadura mecânica. A quantidade de água a utilizar nas amassaduras foi definida e foi sempre a mesma em todas as argamassas.

Para cada argamassa produziram-se 9 provetes prismáticos com dimensões de 40 x 40 x 160 (mm), que foram posteriormente ensaiados aos 28 e 90 dias de idade, com excepção dos ensaios de condutibilidade térmica e de resistência aos sulfatos, realizados aos 120 e 130 dias, respectivamente. A cada idade ensaiaram-se três provetes, tendo outros três permanecido nas respectivas curas para ensaio posterior (fora do âmbito desta dissertação) aos 180 dias de idade.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Os ensaios de análise granulométrica e de determinação da baridade para caracterizar as matérias-primas utilizadas foram realizados no LNEC, no âmbito do projecto financiado pela FCT-MEC METACAL, previamente à execução de todos os trabalhos envolvidos nesta dissertação. No entanto optou-se por incluir o procedimento dos mesmos, uma vez que fazem parte da campanha experimental desenvolvida neste estudo.

3.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foi feita uma análise à granulometria das areias utilizadas na execução das argamassas: APAS12, APAS20 e APAS30, bem como à mistura das mesmas na proporção 1:1,5:1,5, respectivamente. Entre elas, a APAS12 apresentava uma granulometria mais grossa, APAS20 era intermédia e APAS30 era composta por grãos mais finos. Essa análise consistiu em fazer passar os agregados por um conjunto de peneiros com abertura de malha diferentes, com o intuito de separar as partículas em diversas fracções, de acordo com os seus diferentes tamanhos. Sabendo a quantidade retida em cada peneiro e,

por conseguinte, a quantidade que passou em cada um, é possível traçar a curva granulométrica do material analisado.

Todos os processos da realização deste ensaio estiveram por base a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000) e os peneiros utilizados em conformidade com o previsto na ISO 3310-1 (ISO, 2000).

“ (...) Inicialmente foram colocadas em estufa, durante 24h a 110 °C, porções das três areias utilizadas até se obter massa constante. De seguida, foram retiradas quantidades de areias de cada granulometria, esparteladas e pesadas. Esta amostra foi colocada no peneiro de maior abertura da série previamente escolhida e levada a uma peneiração mecânica onde permaneceu durante o tempo necessário à separação das fracções. Deve concluir-se a peneiração quando durante 1 minuto não passar mais de 1% do material retido nesse peneiro.

De seguida efectuou-se a pesagem do material retido em cada peneiro e obteve-se a massa do que passou por todos eles.

Para cada tipo de areia foram ensaiadas três amostras distintas, a partir das quais foi feita uma média.

Os resultados obtidos são expressos em forma de uma curva granulométrica, em função da abertura da malha do peneiro” (Massena, 2011).

Na figura 3.1 apresentam-se as curvas granulométricas das areias APAS 12, APAS 20, APAS 30 e respectiva mistura ao traço volumétrico 1:1,5:1,5, resultante da análise granulométrica realizada no LNEC.

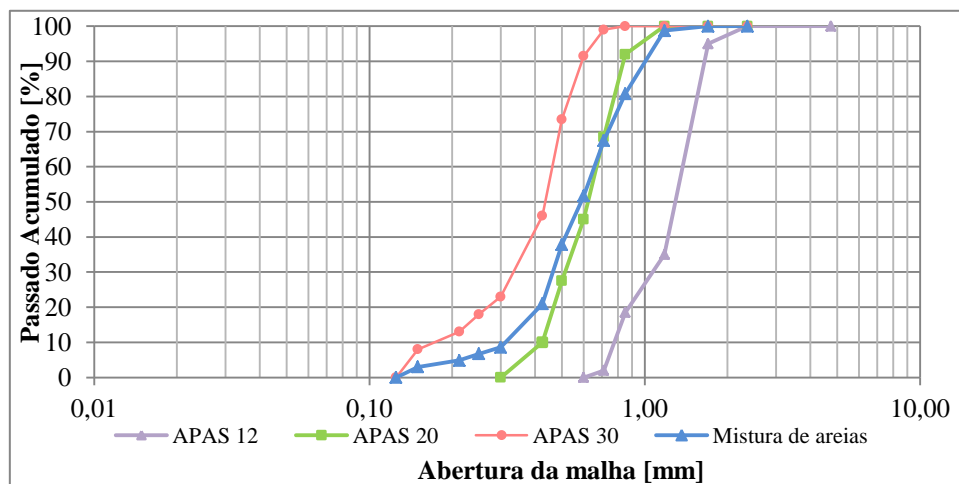


Figura 3.1 – Curvas granulométricas das areias e respectiva mistura.

Observando a figura 3.1, verifica-se que a curva obtida para a mistura de areias apresenta uma granulometria mais variada, quando comparada com as curvas das areias individualmente.

“Da análise efectuada às curvas granulométricas, verifica-se que a máxima dimensão do agregado, que corresponde à máxima dimensão da abertura da malha dos peneiros onde passa uma quantidade de material igual ou superior a 90%, é de 1,18 mm para as areias APAS12 e APAS20 e de 0,71 mm para a areia APAS30. Relativamente à mínima dimensão do agregado, que corresponde à

3. Campanha experimental

mínima dimensão da abertura da malha dos peneiros por onde passa uma quantidade de material igual ou inferior a 5%, é de 0,71 mm para a areia APAS12, de 0,425 mm para a areia APAS20 e de 0,212 para a areia APAS30. No caso da mistura de areias a máxima dimensão do agregado é de 1,18 mm, igual à das areias APAS 12 e APAS20 e inferior ao da areia APAS30, situando-se assim, entre os valores das areias APAS12, APAS20 e APAS30; relativamente à mínima dimensão esta é de 0,425 mm, igual à da areia APAS20 e situando-se no intervalo de valores das areias APAS12 e APAS30”(Massena, 2011).

3.2.2. BARIDADE

Este ensaio tem como objectivo determinar a massa de agregado seco que preenche um recipiente de volume conhecido, e só o é possível realizar a materiais granulares ou pastosos. A baridade permite estabelecer a relação entre traço volumétrico e traço ponderal de uma mistura, utilizada na realização de actividades laboratoriais para facilitar a precisão com que se quantifica determinado material, através da sua massa.

3.2.2.1. Determinação do volume do recipiente

Tendo por base a norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002b) utilizou-se uma balança digital de precisão 0,1g pesou-se um copo e anotou-se a sua massa. De seguida pesou-se o copo com uma placa acrílica colocada por cima do mesmo, de modo a tampá-lo, e anotou-se a massa do conjunto. Fez-se mais uma pesagem, agora com o recipiente cheio de água com o acrílico por cima e anotou-se a massa do conjunto. Através das duas últimas pesagens conseguiu-se determinar, fazendo a diferença entre valores, a massa de água que o copo comportava.

Recorrendo ao uso de um termómetro de mercúrio mediu-se a temperatura da água e fez-se a correspondência à massa volúmica da mesma. Com os valores da massa de água presente no copo e da massa volúmica da água calculou-se o volume do copo, de acordo com expressão de seguida apresentada. O volume do recipiente usado resulta da média de três medições.

$$V_{copo} = \frac{m_{H_2O}}{\rho}$$

Sendo:

V_{copo} – Volume do copo [l]

M_{H_2O} – Massa de água [Kg]

ρ – Massa volúmica [Kg/dm³]

3.2.2.2. Determinação da baridade

Preenche-se o recipiente, de volume já conhecido, com o material a ensaiar tendo o cuidado de se compactar cada terço deixando cair o recipiente 15 vezes de uma altura média de 10 cm numa superfície lisa. Ao completar-se o enchimento, nivela-se a superfície rasando-a com uma régua e determina-se a massa do recipiente cheio.

A baridade (B_a) é calculada através da seguinte expressão (Faria, 2004):

$$B_a = \frac{m_f - m_i}{V} \times 100$$

Sendo:

B_a – Baridade [g/cm^3]

m_f – massa do recipiente cheio [g]

m_i – massa do recipiente [g]

V – volume do recipiente [cm^3]

Os resultados obtidos apresentam-se no quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Baridade dos constituintes das argamassas.

Baridade (g/cm^3)	
Cal hidráulica NHL5	0,821
Metacaulino	0,294
Areia APAS 12	1,412
Areia APAS 20	1,405
Areia APAS 30	1,388
Mistura areias	1,463

3.3. AMASSADURAS

Após terem sido estabelecidas as quantidades necessárias de cada componente das argamassas foi realizado então o processo das amassaduras. Realizaram-se primeiro as argamassas sem metacaulino e posteriormente as que continham metacaulino na sua composição.

Começou-se por pesar as quantidades pretendidas das diferentes areias, cal e metacaulino num tabuleiro, recorrendo-se a uma balança digital de precisão 0,1g, conforme a argamassa que se estava a produzir. Colocou-se o tabuleiro vazio na balança, tarou-se o mesmo e acrescentou-se a quantidade de areia APAS12 necessária. O tabuleiro voltou a ser tarado e posteriormente acrescentou-se a quantidade de areia APAS20 pretendida. Este processo foi repetido para os restantes elementos de cada argamassa de modo a facilitar a leitura das quantidades e evitar erros nas pesagens dos constituintes das mesmas.

3. Campanha experimental

Após terem sido pesadas as quantidades pretendidas de todos os materiais, foi feita uma homogeneização manual da mistura e posteriormente colocada na cuba da misturadora mecânica.

A quantidade de água a juntar à mistura foi medida em provetas graduadas, sempre pelo mesmo operador de modo a minorar o erro. Consoante a argamassa em que se trabalhava, a amassadura foi designada como longa ou de referência, tendo sido em ambos os casos acrescentado água nos primeiros segundos de actuação da misturadora.

3.3.1. TEMPO DE AMASSADURA

Realizaram-se dois tipos de amassadura onde se fez variar o tempo. Para determinadas argamassas efectuou-se um tempo de amassadura de referência, segundo a norma EN 1015-2 (CEN, 1999/2006a), designado como Sm (“Standard mixture”), onde a misturadora mecânica actua durante 90s. Para as restantes argamassas realizou-se uma amassadura mais prolongada, designada por Lm (“Long mixture”) em que se deixou a misturadora actuar durante 150s, interrompendo-se o processo ao fim deste tempo para uma rápida raspagem da pá e paredes da cuba, e posteriormente mais 30s de amassadura. Esta amassadura mais prolongada foi definida e era correntemente utilizada nas amassaduras de argamassas realizadas no âmbito do projecto METACAL (Faria, 2011).

3.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

3.4.1. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA

Para saber a quantidade de água a juntar às misturas previamente definidas, fez-se primeiramente uma amassadura experimental, com o mesmo traço ponderal, mas com metade das quantidades da argamassa J1, que se nomeou como J1 Experimental.

Para determinar a massa volúmica de J1 Experimental e com o volume de um recipiente conhecido, encheu-se o mesmo até cerca de metade, procurando que a argamassa caísse em zona mais central, deixou-se cair um dos lados 10 vezes levantando o bordo 3cm e repetiu-se para o lado oposto. Preencheu-se o copo até cima, repetiu-se o processo de compactação, repôs-se argamassa até cima e rasou-se o copo, tal como previsto na norma EN 1015-6 (CEN, 1998). De seguida pesou-se e anotou-se a massa do copo com argamassa.

Do valor da massa do conjunto (copo+argamassa) subtraiu-se o valor, anteriormente pesado, da massa do copo sem oacrílico, obtendo-se a massa de argamassa que o copo comportava. O quociente entre a massa da argamassa e o volume do copo é a massa volúmica de J1 Experimental.

Em função da massa volúmica determinada pôde-se definir qual a gama de espalhamento de acordo com a norma EN 1015-2 (CEN, 1999/2006a). Esta quantidade de água definida foi a necessária para garantir a trabalhabilidade das argamassas, bem como a sua aplicabilidade.

No Anexo II apresenta-se o valor de massa volúmica determinado, assim como os dados relativos à produção da J1 Experimental e espalhamento obtido.

3.4.2. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Após a amassadura, a influência da água na trabalhabilidade das argamassas foi aferida através da determinação da consistência na mesa de espalhamento.

Para uma argamassa ter uma boa trabalhabilidade terá de ter uma fácil aplicabilidade e, para tal, no estudo em causa e, de acordo com a norma EN 1015-2 (CEN, 1999/2006a), com uma argamassa de massa volúmica na ordem de 2000 kg/m^3 os valores de espalhamento deverão rondar os 170 mm para garantir essas características. No laboratório do DEC da FCT-UNL a mesa de espalhamento não está de acordo com a norma actual EN 1015-3 (CEN, 1999/2004/2006) e como tal os valores obtidos diferenciaram-se um pouco do valor a atingir, por defeito, o que já era esperado.

A determinação da consistência foi feita com base na norma EN 1015-3 (CEN, 1999/2004/2006) e foi realizada em todas as amassaduras, de modo a verificar se os espalhamentos iam de acordo com o esperado. Os utensílios necessários para a sua execução (mesa de espalhamento, cone e varão) foram humedecidos a cada vez da sua utilização. O cone, colocado no centro da mesa, foi preenchido até cerca de metade com a argamassa e de seguida inseriu-se o varão 10 vezes, no mínimo, de modo a eliminar os vazios. O processo foi repetido uma vez mais para encher por completo o cone e de seguida o excesso foi rasado. Retirou-se o cone, ficando a amostra da argamassa no centro da mesa, fez-se rodar o mecanismo de modo a que a mesa sofresse 15 quedas em 15 segundos e mediu-se o diâmetro da amostra num mínimo de 4 direcções com o auxílio de uma craveira e uma régua.

O valor de espalhamento para cada argamassa correspondeu à média de 3 ou 4 leituras.



Figura 3.2 - Determinação da consistência por espalhamento: amostra antes e depois de sofrer as 15 quedas.

No quadro 3.2 apresentam-se as quantidades de cada constituinte das argamassas - as areias que compuseram a mistura, metacaulino (Mk), cal hidráulica (NHL5) e água, bem como a respectiva designação.

3. Campanha experimental

Quadro 3.2 – Designação das argamassas e quantidade dos constituintes.

Argamassa	Designação	Massa (g)					Água (ml)
		APAS12	APAS20	APAS30	Mk	NHL5	
J1	Lm_Hc	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	875,7	950,0
J9	Lm_Hc_2	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	875,7	950,0
J2	Sm_Sc	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	875,7	950,0
J10	Sm_Sc_2	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	875,7	950,0
J3	Sm_Hc	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	875,7	950,0
J4	Sm_Hc_10Mk	1129,6	1686,0	1665,6	87,6	788,2	950,0
J5	Sm_Sc_10Mk	1129,6	1686,0	1665,6	87,6	788,2	950,0
J6	Lm_Hc_5Mk	1129,6	1686,0	1665,6	43,8	831,9	950,0
J7	Lm_Hc_10Mk	1129,6	1686,0	1665,6	87,6	788,2	950,0
J8	Lm_Hc_20Mk	1129,6	1686,0	1665,6	175,1	700,6	950,0

3.5. EXECUÇÃO DOS PROVETES E CONDIÇÕES DE CURA

3.5.1. MOLDAGEM, DESMOLDAGEM E CURA INICIAL

Após a determinação da consistência por espalhamento, a argamassa foi colocada em moldes para a execução dos provetes. Foram utilizados moldes metálicos prismáticos com dimensões 40x40x160 mm, que previamente tinham sido pincelados com óleo descofrante (óleo de automóvel e massa consistente em proporções idênticas), com o intuito de facilitar a posterior desmoldagem dos provetes.

Com os moldes colocados e bem fixos no compactador mecânico e com um acrescento próprio na vertical, preencheram-se os mesmos até mais de metade da sua profundidade e fez-se actuar o compactador até perfazer 20 pancadas. De seguida preencheram-se os moldes na sua totalidade, e repetiram-se as 20 pancadas. Rasou-se a argamassa em excesso e repetiu-se o processo, perfazendo em todas as argamassas 3 moldes de cada, ou seja, produzindo-se 9 provetes de cada argamassa.

Na execução dos provetes, os processos realizados foram de acordo com a norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006) à excepção do número de pancadas, em que a norma prevê 60 pancadas em vez das 20 realizadas por compactação mecânica.



Figura 3.3 – Compactação mecânica e provetes frescos nos moldes.

Após moldagem, e conforme recomendado pela norma EN 1015-11 (CEN, 1999/2006b), os provetes foram mantidos, durante 2 dias, dentro de sacos de polietileno fechados, após os quais foram desmoldados, tendo ficado mais 5 dias dentro dos mesmos sacos fechados.

A desmoldagem foi realizada com bastante cuidado no manuseamento dos utensílios utilizados, bem como dos próprios provetes, de modo a não os danificar. Com os provetes desmoldados procedeu-se à sua identificação e recolocação dentro dos sacos de polietileno.



Figura 3.4 – Desmoldagem dos provetes e colocação dentro de sacos de polietileno.

3.5.2. CONDIÇÕES DE CURA

Ao sétimo dia colocaram-se os provetes de argamassa em dois tipos de cura distintos: uma segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999/2006b), isto é, em condições de humidade relativa de $65\pm 5\%$ e a uma temperatura de $20\pm 5^\circ\text{C}$, numa sala climatizada e controlada, designada por Sc (“Standard cure”), e uma segunda em cura húmida, onde os provetes permaneceram em ambiente com $90\pm 5\%$ de humidade relativa a uma temperatura de $20\pm 5^\circ\text{C}$, designada por Hc (“Humid cure”), numa sala criada para o efeito.

As condições da sala de cura húmida são apresentadas no Anexo I, sempre que foi possível obter o registo de humidade relativa e de temperatura por sensor.



Figura 3.5 – Provetes nas salas de cura standard, Sc, e de cura húmida, Hc.

3. Campanha experimental

No quadro 3.3, em forma de síntese, apresentam-se as argamassas realizadas e respectivas designações, de acordo com a sua constituição, tipo de amassadura e condições de cura a que foram sujeitas.

Quadro 3.3 - Argamassas realizadas, tipos de amassadura e cura e respectivas designações.

Argamassa	Descrição	Designação
J1 e J9	Mistura longa e cura húmida	Lm_Hc
J2 e J10	Mistura e cura standard	Sm_Sc
J3	Mistura standard e cura húmida	Sm_Hc
J4	Mistura standard e cura húmida com substituição de 10% de massa de cal por metacaulino	Sm_Hc_10Mk
J5	Mistura e cura standard com substituição de 10% de massa de cal por metacaulino	Sm_Sc_10Mk
J6	Mistura longa e cura húmida com substituição de 5% de massa de cal por metacaulino	Lm_Hc_5Mk
J7	Mistura longa e cura húmida com substituição de 10% de massa de cal por metacaulino	Lm_Hc_10Mk
J8	Mistura longa e cura húmida com substituição de 20% de massa de cal por metacaulino	Lm_Hc_20Mk

3.6. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

3.6.1. PLANEAMENTO DOS ENSAIOS

No decorrer da campanha experimental os provetes de argamassa produzidos foram ensaiados aos 28 e 90 dias. Dos 9 provetes produzidos no total por argamassa, foram utilizados 6 para ensaios aos 28 dias (provetes 1 a 3) e aos 90 dias (provetes 4 a 6). Os restantes 3 provetes permaneceram nas respectivas curas para estudos futuros.

Nos casos das argamassas Lm_Hc, Lm_Hc_2 (J1 e J9) e Sm_Sc, Sm_Sc_2 (J2 e J10) agruparam-se os provetes, uma vez que se tratavam de argamassas exactamente iguais e os resultados obtidos nos ensaios (excepto a consistência por espalhamento) foram muito próximos. Assim, para as argamassas Lm_Hc e Sm_Sc os resultados finais resultam da média dos valores obtidos nos ensaios de 6 provetes, enquanto nas restantes a média foi feita a uma amostra de 3 provetes.

Quer aos 28 dias como aos 90 dias o planeamento seguido para os ensaios foi o mesmo. Para cada provete foi feito, em primeiro lugar, o ensaio da determinação do módulo de elasticidade dinâmico (Ed), seguido da determinação da resistência à tracção (Rt) e por fim o ensaio da determinação da resistência à compressão (Rc). Do ensaio de resistência à tracção restaram 2 metades de provete, que foram utilizadas, respectivamente, para o ensaio de absorção de água por capilaridade (a metade em melhores condições) e para o ensaio de resistência à compressão. A parte que serviu para o ensaio de absorção de água por capilaridade foi a mesma que foi submetida de seguida ao ensaio de secagem.

Após o ensaio de resistência à compressão (feito a uma das metades resultantes do ensaio de resistência à tracção) as partes resultantes foram 3, tendo sido uma delas (a base do provete) reservada para o ensaio de determinação da porosidade aberta (Pab), e as restantes foram secas em estufa e ensacadas em pequenos sacos de plástico – as partes centrais tendo como destino o LNEC onde foram ensaiadas química e mineralogicamente.

3.6.2. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Como referido anteriormente, este ensaio foi realizado aos 28 e 90 dias, aos três provetes respectivos de cada argamassa em cada uma das idades. Os ensaios realizaram-se no laboratório de ensaios mecânicos e durabilidade da Secção de Construção e Hidráulica da FCT - UNL, e utilizou-se um equipamento específico “Zeus Resonance Meter”.

Previamente à sua realização, todos os provetes a ensaiar que se encontravam na sala de cura húmida (Hc) foram colocados 24h antes do ensaio na sala de cura Standard (Sc), juntando-se aos que já lá estavam, com o intuito de tentar restabelecer condições semelhantes às da cura standard. Este período permite baixar o teor em água dos provetes que vêm de curas mais húmidas, uma vez que este tem influência directa na precisão e nos resultados obtidos nos ensaios e, nomeadamente no da determinação do módulo de elasticidade dinâmico (Faria, 2004).

Este ensaio consiste na determinação da frequência de ressonância longitudinal, em provetes prismáticos, através da emissão de vibrações (Felgueiras, 2011) e teve por base a norma NP EN 14146 (IPQ, 2006).

Inicialmente foram pesados todos os provetes a ensaiar, recorrendo-se a uma balança digital de precisão 0,001g, e registaram-se as suas massas. Seguidamente colocaram-se os provetes, um a um, no equipamento específico e fizeram-se as leituras necessárias. Para cada provete realizaram-se um mínimo de 4 leituras, alterando-se a posição do mesmo entre elas. O equipamento integra um computador com um software adequado ao ensaio, onde se inseriram a massa e dimensões de cada provete, obtendo-se um valor de E_d em MPa.

A equação de cálculo utilizada pelo sistema (Faria, 2004) é a seguinte:

$$E_d = \frac{2 \times L \times f_0 \times \rho}{g \times 10^{-4}}$$

Sendo:

E_d - Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]

L - Comprimento do provete [m]

f_0 - Frequência da ressonância longitudinal [Hz]

ρ - Massa volúmica do provete [N/m³]

g - Aceleração gravitacional [9,8 m/s²]



Figura 3.6 - Equipamento para determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico.

3.6.3. DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À TRACÇÃO POR FLEXÃO E DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A realização destes ensaios foi feita aos 28 dias na FCT-UNL, enquanto aos 90 dias a sua realização teve lugar no LNEC. Esta alteração deveu-se a um problema com o equipamento existente na FCT-UNL na data dos ensaios a 90 dias de idade, que impediu a utilização do mesmo. Deste modo e para garantir a idade pretendida das argamassas aquando da realização dos ensaios, optou-se por realizar os mesmos no LNEC sob alçada da Doutora Rosário Veiga, uma das investigadoras do projecto METACAL.

Todos os procedimentos de ambos os ensaios foram realizados tendo por base a norma EN1015-11 (CEN, 1999/2006b).

3.6.3.1. Determinação da Resistência à Tracção por Flexão (R_t) aos 28 dias na FCT-UNL

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga pontual a meio vão do provete até se atingir a rotura do mesmo. Os provetes prismáticos estão apoiados sobre uma face, em dois pontos que distam entre eles 100 mm. A força é aplicada na face oposta e a face apoiada, ao ser traccionada, atinge a rotura. Foram ensaiados 3 provetes por argamassa, tendo sido utilizada no laboratório do DEC/FCT-UNL a máquina “ZWICK Z050” com uma célula de carga de 2kN, e uma velocidade de aplicação de carga de 0,2 mm/min.

É de referir que os provetes das argamassas que se encontravam em cura húmida (H_c) apresentaram-se bastante húmidos no seu interior (figura 3.7).

O provete foi colocado na prensa de flexão, de modo que ficasse centrado e com o eixo longitudinal perpendicular ao plano da força aplicada. Foi tido o cuidado de que a face rugosa (face exposta ao ar no molde) não ficasse em contacto nem com os apoios, nem com o ponto de aplicação da força, escolhendo-se aquela que não apresentava vazios como face a ser traccionada, isto é, face apoiada na prensa.

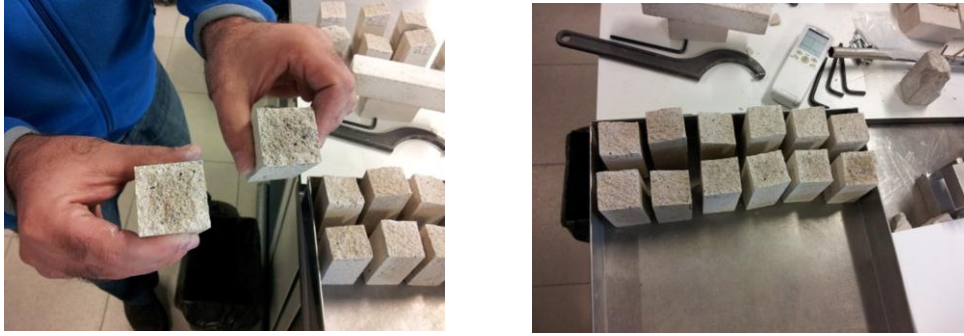


Figura 3.7 – Observação dos provetes após ensaio de resistência à tracção por flexão com os provetes húmidos no seu interior.

O ensaio termina assim que o provete atinge a rotura. Registou-se a força máxima (F_t) a que o provete foi sujeito até se dar a rotura e o tempo decorrido até à mesma, de forma a que os limites do tempo de ensaio estipulados na norma fossem respeitados.

A resistência à tracção por compressão foi calculada através da seguinte expressão:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_t \times l}{b \times d^2} \times 10^3$$

Sendo:

R_t – Resistência à tracção por flexão [MPa]

F_t – Carga de rotura de tracção por flexão [kN]

l – Distância entre apoios [mm]

b – Espessura do provete [mm]

d - Profundidade do provete [mm]



Figura 3.8 – Execução do ensaio de resistência à tracção por flexão na “ZWICK Z050”.

3. Campanha experimental



Figura 3.9 - Formação de superfície de rotura no ensaio de tracção por flexão.

3.6.3.2. Determinação da Resistência à Compressão (R_c) aos 28 dias na FCT-UNL

Na FCT-UNL, o ensaio foi realizado logo após a realização do ensaio de determinação da resistência à tracção por flexão a todos os provetes, na mesma máquina, mas com uma célula de carga de 50 kN e uma velocidade de aplicação de carga de 0,7 mm/min.

Colocou-se o provete centrado na máquina utilizando-se um molde metálico, para garantir uma melhor aderência entre o provete e as prensas do equipamento. Novamente, teve-se o cuidado de que a face rugosa do provete não ficasse em contacto com nenhum dos elementos de apoio do aparelho de compressão.

O ensaio dá-se por terminado quando é atingida a rotura do provete, registando-se a respectiva força (F_c) e o tempo decorrido, de modo a garantir que os limites de tempo do ensaio estabelecidos pela norma eram respeitados.

A resistência à compressão foi calculada pela seguinte expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{Secção}$$

Sendo:

R_c – Resistência à compressão [MPa]

F_c – Carga de rotura à compressão [kN]

Secção – Área da secção da aplicação da carga [mm²]

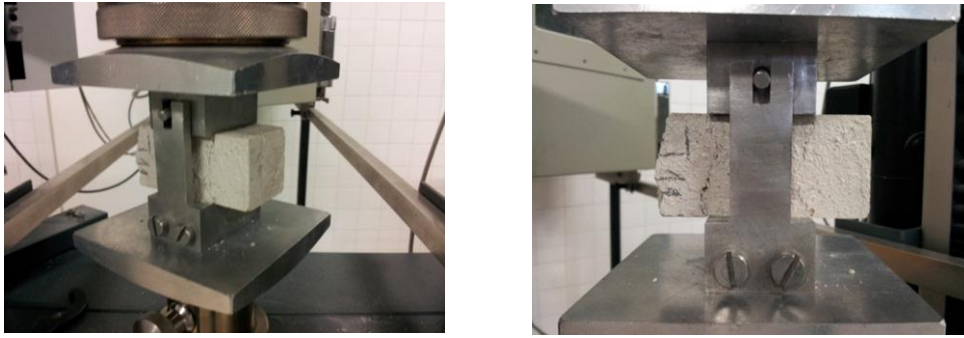


Figura 3.10 – Formação da superfície de rotura no ensaio de resistência à compressão.

3.6.3.3. Determinação da Resistência à Tracção por Flexão (R_t) aos 90 dias no LNEC

Relativamente ao ensaio de 28 dias decorrido na FCT-UNL, este ensaio aos 90 dias de idade realizado no LNEC diferiu apenas no equipamento utilizado e na velocidade de aplicação de carga. Neste caso a velocidade imposta foi de 10 N/s em cada ensaio.

Por se tratar de outro aparelho, o funcionamento do mesmo não é exactamente igual ao do existente no laboratório do DEC/FCT-UNL e utilizado aos 28 dias. Enquanto no LNEC a colocação dos provetes e respectivo ajuste com as prensas é controlado pelo operador, o mesmo funcionava automaticamente na ZWICK da FCT-UNL. Esta operação, desta forma, requer bastante cuidado para não quebrar logo o provete na sua colocação, tendo mesmo sucedido em um dos provetes ensaiados.

Todo o restante procedimento experimental decorreu da mesma forma, bem como o cálculo dos valores de resistência à tracção, descritos anteriormente no mesmo ensaio à idade mais jovem.

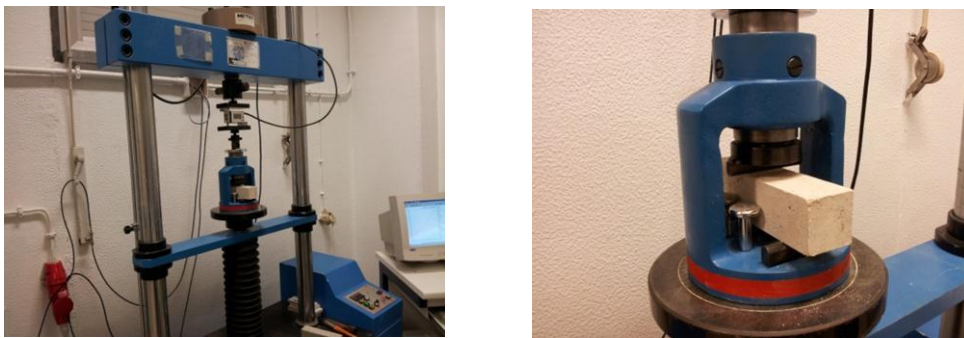


Figura 3.11 – Ajuste manual no ensaio de resistência à tracção no LNEC.

3.6.3.4. Determinação da Resistência à Compressão (R_c) aos 90 dias no LNEC

Este ensaio foi realizado no LNEC, com a mesma máquina que se utilizou para a determinação da resistência à tracção por flexão. Comparativamente ao aparelho utilizado para os ensaios aos 28 dias de idade, para além do ajuste manual da prensa já referido, a célula de carga utilizada foi de 200 kN (em contraste com a de 50 kN utilizada na FCT-UNL) a uma velocidade de aplicação de carga de 50

3. Campanha experimental

N/s. Para além disso, os provetes foram ensaiados sem a utilização de qualquer tipo de molde metálico, tendo sido colocados directamente na máquina que já dispunha de apoios adequados.

O procedimento experimental decorreu da mesma forma que anteriormente, aos 28 dias na FCT-UNL, assim como o cálculo da resistência à compressão, descritos anteriormente no mesmo ensaio à idade mais jovem.



Figura 3.12 – Meio provete colocado no aparelho de ensaio de resistência à compressão no LNEC e resultado do mesmo.

3.6.4. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Com a realização deste ensaio foi possível analisar a curva de capilaridade de cada uma das argamassas, através dos registos dos ganhos de massa de cada provete ao longo do tempo, quando em contacto com a água. Traçaram-se gráficos da quantidade de água absorvida por unidade de área da base de cada provete (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo decorrido ($\text{min}^{0.5}$). O valor assintótico (VA) da curva de capilaridade representa a quantidade total de água que, por unidade de superfície, penetra pelos poros da argamassa, e o seu declive inicial traduz a velocidade com que sucede – coeficiente de capilaridade (CC) (Faria, 2004).

O ensaio teve por base as normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009), foi realizado aos 28 e 90 dias de cura, na sala de cura de referência (S_c) do DEC/FCT-UNL, aos 3 meios provetes de cada argamassa, resultantes do ensaio de determinação da resistência à tracção.

Os provetes estiveram inicialmente um mínimo de 2 dias na estufa a uma temperatura de 60°C , de modo a garantir que atingissem massa constante (variação de massa inferior a 0,1% em 24 horas). A preparação dos provetes para o ensaio foi feita de modo diferente entre os 28 e 90 dias de idade. Para garantir uma ascensão e, especialmente, uma evaporação de água unidireccional, no ensaio aos 90 dias optou-se por revestir os provetes a ensaiar com película aderente em todas as faces laterais, deixando a descoberto tanto a base como o topo, com o intuito de impermeabilizar as suas faces. Para evitar pequenas perdas de massa da base dos provetes, utilizou-se também uma rede de gaze onde se apoiaram os provetes, fixa com um elástico. Contrariamente, aos 28 dias não se utilizou qualquer

acessório e os provetes foram colocados directamente na caixa onde foi previamente criado ambiente saturado, de modo a minorar, mesmo sem impermeabilização lateral, efeitos bidireccionais.

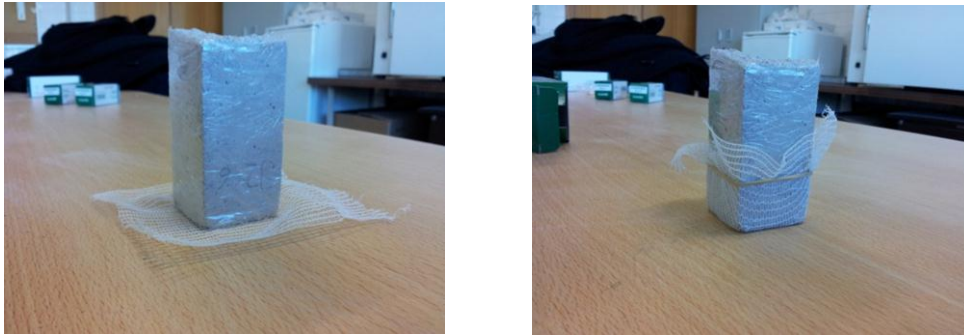


Figura 3.13 – Preparação dos meios provetes para ensaio de absorção de água por capilaridade aos 90 dias.

Anteriormente à preparação dos provetes já descrita preparou-se o meio físico onde o ensaio decorreu. Assim, na sala de cura de referência (Sc) do DEC/FCT-UNL colocaram-se caixas de plástico estanques com um tabuleiro no seu interior, apoiado em 2 tijolos submersos em água, de modo a criar um ambiente saturado. Na base do tabuleiro foi colocada uma rede plástica impermeável e com a ajuda de um nível de bolha garantiu-se a planeza do tabuleiro. A base do tabuleiro foi preenchida com água e manteve-se uma altura da lâmina de água de 5mm ao longo do ensaio. Sempre que necessário, rectificou-se o nível de água utilizando um esguicho, tendo sempre o cuidado de não molhar directamente os provetes.

Depois de todos os materiais preparados deu-se início ao ensaio. Efectuou-se a primeira pesagem de cada provete, com uma balança digital de precisão 0,001g, e colocaram-se os provetes, à medida que se iam pesando, dentro da caixa, sempre na mesma ordem, para facilitar os processos. Repetiram-se as pesagens aos 5, 10, 15, e 30 min, e depois às 1, 2, 3, 5, 7 e 9h, e posteriormente de 24 em 24 horas, até que a diferença de massa entre pesagens consecutivas fosse inferior ou igual a 1%.

As caixas só foram abertas para efectuar as pesagens, estando fechadas sempre que possível, inclusive entre as pesagens.

Tanto aos 28 dias como aos 90, foi necessário efectuar pesagens até às 9h do primeiro dia, para se obter a curva que sucede a recta que determina o valor de coeficiente de capilaridade. As restantes pesagens, de 24 em 24 horas, determinam o andamento do troço da recta de menor inclinação que dá indicação do valor assintótico (Felgueiras, 2011).

3. Campanha experimental

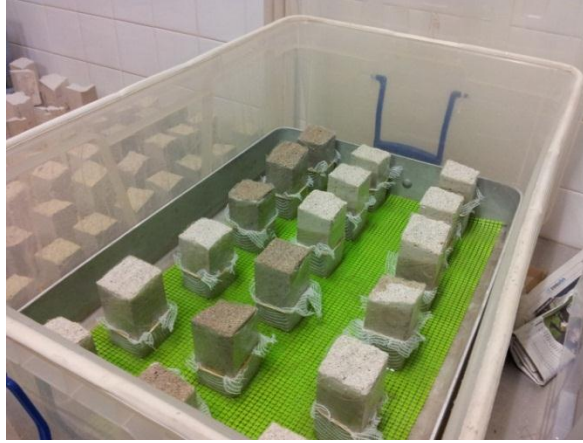


Figura 3.14 – Determinação de absorção de água por capilaridade aos 90 dias



Figura 3.15 – Balança utilizada e provetes dentro da caixa em contacto com água no ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias de idade.

3.6.5. DETERMINAÇÃO DA SECAGEM

A curva de secagem dada pela variação do teor em água em função do tempo decorrido foi calculada para uma melhor compreensão do comportamento de cada argamassa. Neste ensaio avaliou-se a rapidez de secagem de cada argamassa através da determinação do índice de secagem, com a expressão utilizada por Brito (2009), com base em especificação de ensaio da RILEM (1980).

Para calcular o índice de secagem utilizou-se a expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right]}{Q_{\text{máx}} \times t_f}$$

Sendo:

IS – Índice de Secagem [-]

t_i – Tempo de ensaio no instante i [h]

t_f - Tempo final de ensaio [h]

Q_i – Teor em água do provete no instante i [%]

$Q_{máx}$ – Teor em água do provete no início do ensaio [%]

Calculou-se o teor em água dos provetes através da expressão:

$$Q_t = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [%]}$$

Sendo:

Q_t – Teor em água [%]

m_i – Massa do provete no instante i [Kg]

m_0 – Massa do provete seco [Kg]

O ensaio decorreu na sala de cura de referência (Sc) do DEC/FCT-UNL, quer aos 28 como aos 90 dias, imediatamente após a realização do ensaio de capilaridade, nas diferentes condições que os meios provetes tinham para cada uma das idades (preparações dos provetes diferentes aos 28 e 90 dias). Foram seguidos os procedimentos com base em especificações de ensaio da RILEM (1980).

Os meios provetes saturados (3 de cada argamassa) foram retirados das caixas onde decorreu o ensaio de absorção de água por capilaridade e colocados numa das bancadas da sala de cura de referência (Sc) directamente apoiados sobre a bancada com tampo inox perfeitamente liso. Aos 90 dias, antes de se iniciar o ensaio, foi retirada a rede em gaze que cobria a base dos provetes, assim como o elástico, ficando apenas a película aderente a envolver os meios provetes. No caso das argamassas ensaiadas aos 28 dias, foram utilizadas tal e qual como estavam findo o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Deu-se início ao ensaio com a pesagem de cada um dos meios provetes, numa balança de precisão 0,001g, e repetiu-se a pesagem hora a hora até completar as 7 horas e depois de 24 em 24 horas até que os meios provetes atingissem massa constante, ou o valor de massa que tinham antes de iniciar o ensaio de capilaridade.



Figura 3.16 - Ensaio de secagem aos 90 dias.

3. Campanha experimental

3.6.6. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA

A técnica da absorção de água, para determinar a porosidade, tem dado facilmente e repetidamente boas noções sobre as características de permeabilidade das argamassas. Este método assume que somente os poros que estão ligados entre si e a superfície da amostra podem ser medidos e apenas os poros são preenchidos com o líquido. Esta técnica pode não abranger muita informação no que diz respeito à porosimetria (distribuição da dimensão dos poros), mas permite obter uma imagem representativa da estrutura porosa da argamassa (Stefanidou, 2010).

Este ensaio foi realizado aos 28 e aos 90 dias, utilizando-se uma das partes resultantes do ensaio de compressão em cada uma das idades. Como referido anteriormente, após o ensaio de compressão resultaram 3 partes e o topo/base foi a parte utilizada na determinação da porosidade aberta (Pab).

Os procedimentos levados a cabo neste ensaio tiveram por base a norma EN 1936 (CEN, 1999), que, por ser direccionada a provetes de pedra natural, sofreram algumas alterações.

À semelhança do sucedido nos ensaios de absorção de água por capilaridade e de secagem, a preparação dos provetes foi diferente entre os 28 e 90 dias de idade. Aos 90 dias optou-se por colocar as amostras dentro de collants “de vidro”, com o intuito de evitar a perda de massa das mesmas durante o ensaio, medida esta não levada a cabo anteriormente, à idade mais jovem das argamassas (28 dias).



Figura 3.17 – Preparação das amostras para determinação da porosidade aberta aos 90 dias.

Inicialmente secaram-se as amostras em estufa a 60°C até estarem em massa constante; pesaram-se as amostras, numa balança de precisão de 0,001g, tendo o cuidado prévio de se fazer uma limpeza manual das partículas que estavam soltas. Colocaram-se as amostras no exsiccador de maneira a que não estivessem em contacto com as paredes do mesmo nem entre si, garantindo sempre uma área circundante livre para cada amostra.

Com todas as amostras acondicionadas dentro do exsiccador e este bem selado, fez-se actuar a bomba de vácuo, para retirar o ar de dentro do exsiccador, durante 24 horas até se atingir uma pressão de 20Torr (aproximadamente 0,0267bar). Findo este período, encheu-se o exsiccador com água, de

modo a que todos os provetes ficassem submersos, mas garantindo que o nível de água não igualasse o da entrada da bomba, deixando-se actuar por mais 24 horas.

Ao fim deste tempo desligou-se a bomba de vácuo, abriram-se as entradas anteriormente seladas, e deixaram-se ficar as amostras nestas condições, novamente durante 24 horas.

Todo este processo tem como objectivo a saída do ar de dentro dos poros das amostras e que estes sejam depois preenchidos com água.

Com este processo finalizado, retiraram-se as amostras de dentro do exsicador e procederam-se às pesagens hidrostática e saturada. No primeiro caso utilizou-se um dispositivo em forma de cesto, preso inferiormente à balança e dentro de água, onde se colocou cada amostra e se registou a sua massa hidrostática. Por cada 2 pesagens deste tipo fez-se uma da amostra saturada, tendo-se intercalado as mesmas com o propósito de, por um lado, não deixar secar as amostras (caso se tivesse feito a pesagem hidrostática a todas as amostras) e por outro, deixar a amostra repousar uns instantes para perder o excesso de água superficial.

Aos 90 dias de idade o processo foi exactamente o mesmo com excepção da preparação das amostras numa fase inicial. Assim, antes de colocá-las dentro de collants, pesaram-se as mesmas e registaram-se os valores de massa. Depois disso cortaram-se pedaços de collants e com um nó numa extremidade envolveu-se a amostra e fez-se outro nó na outra extremidade garantindo o melhor isolamento possível. Pesaram-se as amostras dentro dos collants, registaram-se os valores e deu-se início ao ensaio propriamente dito com a colocação das mesmas no exsicador e restantes processos.



Figura 3.18 – Determinação da porosidade aberta aos 28 dias: amostras colocadas no exsicador e após 48h submersas em água.

Com o ensaio concluído procedeu-se ao cálculo da porosidade aberta (Pab) através da expressão:

$$Pab = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

Sendo:

Pab – Porosidade aberta [%]

m_1 – Massa da amostra do provete seco [g]

3. Campanha experimental

m_2 – Massa hidrostática da amostra do provete [g]

m_3 – Massa da amostra do provete saturado [g]

Nas pesagens aos 90 dias tomou-se em consideração a massa seca, hidrostática e saturada da parte de collant.

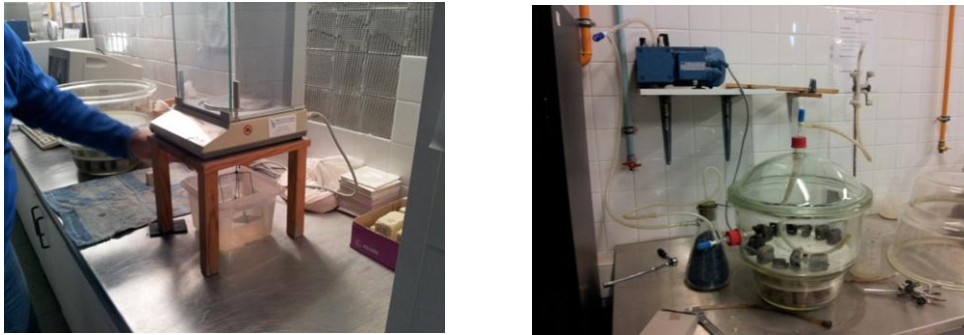


Figura 3.19 – Material utilizado para as pesagens hidrostáticas e amostras no exsiccador a vácuo aos 90 dias.

3.6.7. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

O ensaio foi realizado à idade de 120 dias, tendo-se utilizado os provetes ensaiados aos 28 dias (após os ensaios mecânicos, de capilaridade e secagem) que se encontravam na sala de cura de referência (Sc), num ambiente com 65 ± 5 % de humidade relativa e uma temperatura 20 ± 5 °C.

O aparelho, ISOMET, utilizado na realização do ensaio utiliza uma sonda para efectuar medições de coeficiente de condutibilidade térmica (λ) e afere também a velocidade de dissipação de calor (a). A medição baseia-se na análise da resposta térmica do material aos impulsos de calor emitidos pela sonda da máquina. O fluxo de calor é criado através de uma resistência eléctrica induzida à sonda, que está em contacto directo com o provete ensaiado. A avaliação da condutibilidade térmica é feita através do registo periódico dos valores de temperatura em função do tempo.

A realização deste ensaio prevê a utilização de amostras a analisar com uma área de pelo menos 60 mm de diâmetro e 10 a 15 mm de espessura. Neste caso, como as amostras analisadas foram meios provetes com cerca de 80x40 mm de área, o diâmetro mínimo recomendável não era cumprido e os valores de coeficiente de condutibilidade térmica (λ) obtidos não serão os mais precisos e fidedignos. No entanto, como as condições de análise foram iguais para todos os provetes, considera-se permitir estabelecer uma comparação entre as diferentes argamassas.

Foram utilizados 2 provetes por argamassa, exceptuando as argamassas com teores de substituição crescentes de metacaulino (5%, 10% e 20%), onde foram ensaiados 3 provetes para cada uma delas,

para maior precisão e uma vez que os resultados obtidos (em termos de desvio-padrão) assim o ditaram.

O provete a ensaiar foi colocado em cima de uma placa de XPS impedindo que se dê transmissão de calor para onde esteve assente; neste caso, a bancada do laboratório do DEC/FCT-UNL.

Foram realizadas 3 leituras por provete nas 3 faces lisas. Tendo o provete deitado sobre uma das faces lisas (que não a oposta à face rugosa), fez-se a primeira leitura com a sonda sobre a face voltada para cima, rodou-se o provete de modo a ficar essa face em contacto com o XPS e fez-se mais uma leitura. Por fim colocou-se o provete apoiado sobre a face rugosa (face que ficou em contacto com o ar no molde) e fez-se a terceira leitura.



Figura 3.20 – Sistema (ISOMET e respectiva sonda) utilizado no ensaio de condutibilidade térmica.

3.6.8. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AOS SULFATOS

No caso de argamassas de cimento ou de outros ligantes hidráulicos, na presença de sulfatos, o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a etringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) e a taumasite ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) são os principais produtos formados. São altamente expansivos e como tal, a sua formação leva à destruição total do material de uma forma gradual (Karatasios et al., 2008).

Para além dos ambientes urbanos, a água presente nos solos pode também conter sulfatos solúveis provenientes do uso de produtos químicos na agricultura. Como consequência, o tempo de vida, a longo-prazo, de argamassas enterradas ou em contacto com água dos solos, pode ser afectada.

O principal factor que controla a resistência de argamassas contra o ataque de sulfatos é a estrutura química do seu ligante. Uma típica tentativa de redução da taxa de degradação de argamassas de reabilitação envolve a substituição parcial de cal por materiais pozolânicos. As pozolanas modificam as propriedades químicas do ligante, assim como as características da porosidade das argamassas, afectando a durabilidade a longo-prazo de argamassas sujeitas a ambientes sulfurosos (Karatasios et al., 2008).

3. Campanha experimental

3.6.8.1. Procedimento experimental

O ensaio de determinação da resistência aos sulfatos ocorreu aos 130 dias de idade das argamassas e foi realizado a todos os meios provetes utilizados anteriormente nos ensaios de capilaridade e de secagem aos 28 e 90 dias. Desde a data dos referidos ensaios (28 e 90 dias), os provetes permaneceram na sala de cura de referência (Sc), em condições de humidade relativa de 65 ± 5 % e temperatura de 20 ± 5 °C, até à data de realização deste ensaio.

O procedimento experimental foi realizado tendo por base a norma NP EN 12370 (IPQ, 2001) desenvolvida para pedras naturais e, como tal, com algumas alterações adequadas ao material em análise.

Inicialmente foram preparadas caixas de plástico estanques com uma rede plástica na base, que garantisse alguma altura aos provetes. Preparou-se uma solução de sulfato de sódio, tendo-se colocado 329g de sulfato de sódio anidro (99,9% de pureza) em 10l de água e misturou-se, de modo a obter-se uma solução homogénea.

Todos os meios provetes foram colocados em estufa, a 100 °C, até que estivessem secos e com massa constante, retirados da estufa (arrefecidos ao ar cerca de 15/20 minutos), pesados numa balança de precisão de 0,001g e colocados dentro das caixas, apoiados sobre as redes de plástico e imersos na solução anteriormente preparada. A colocação dos meios provetes nas caixas foi feita de modo a garantir um espaçamento entre eles de cerca de 1cm e 2cm para as paredes da caixa, assim como foi garantida a total imersão dos mesmos na solução, ao longo do ensaio. Permaneceram nestas condições, fechados nas caixas, durante 2 horas e foram novamente colocados em estufa, onde permaneceram até o dia seguinte (cerca de 21 h, no mínimo), tendo sido novamente pesados, perfazendo deste modo, um ciclo. Realizaram-se 20 ciclos, analisando-se a perda de massa dos provetes, ou então até à destruição dos mesmos.

Como referido anteriormente, toda a campanha experimental foi realizada em paralelo com o trabalho experimental de Tiago Branco, no âmbito da sua dissertação de mestrado. Como tal, a realização deste ensaio foi feita a 144 provetes (60 provetes de cal hidráulica e 84 de cal aérea), todos eles colocados na mesma estufa o que poderá ter dificultado a sua secagem. Aquando da retirada dos provetes da estufa, em cada ciclo, verificou-se que uns se encontravam mais secos que outros (apenas por manuseamento dos mesmos), de acordo com a posição em que tinham ficado na estufa. Ou seja, aqueles que ficavam na prateleira central apresentavam-se mais secos que os restantes.

Esta situação poderá ter tido influência nos resultados do ensaio, embora se tenham obtido padrões suficientemente precisos, de modo a diferenciar o comportamento das diferentes argamassas.



Figura 3.21 – Provetes imersos na solução e colocados na estufa depois das 2 horas de imersão.



Figura 3.22 – Provete de cal aérea (mais claros) e de cal hidráulica ao fim do 2º e 20º ciclo.

3.6.9. ENSAIOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS

Todas as argamassas foram alvo de análise e as amostras utilizadas, como anteriormente referido, foram retiradas das partes centrais resultantes do ensaio de compressão aos meios provetes após terem sido secas, ensacadas e directamente levadas para o LNEC. Os ensaios realizados avaliam a análise mineralógica por difractometria de raios X e análise térmica simultânea (termogravimetria e análise térmica diferencial).

3.6.9.1. Análise por difracção de raios X (DRX)

A maioria dos materiais sólidos organizam-se segundo uma estrutura cristalina. A técnica da difracção dos raios X assenta na periodicidade tridimensional da estrutura interna dos corpos cristalinos e no facto de o comprimento de onda dos raios X ser da mesma ordem de grandeza das distâncias interatómicas.

A análise por difracção dos raios X baseia-se no facto de os planos cristalográficos de um composto irradiado por um feixe monocromático de raios X, com comprimento de onda λ , reflectirem a radiação quando se cumpre a Lei de Bragg:

3. Campanha experimental

$$2d.\text{sen}\theta = n.\lambda$$

Sendo:

n – Número inteiro

λ – Comprimento de onda dos raios X [Å]

d – Distância interplanar (específica de cada substância)

θ – Ângulo de incidência do feixe

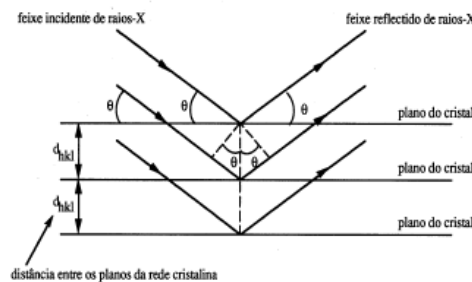


Figura 3.23 – Difracção dos raios X.

Tal como numa impressão digital, a identificação da espécie cristalográfica é feita por comparação directa com fichas de difracção previamente conhecidas e específicas de cada grupo mineral. Existe também um software específico para identificação em computador, com apoio numa base de dados bastante completa. A identificação das espécies cristalinas é feita por comparação sistemática da posição e intensidade de todos os picos de difracção do difractograma da espécie desconhecida com os do difractograma padrão (Pinto, 2004).

Procedimento Experimental

As amostras foram desagregadas em pedaços e colocadas a secar em estufa, a uma temperatura de 40°C durante 24h. Posteriormente, e de forma a intensificar os compostos cristalinos da pasta do ligante, procedeu-se à separação cuidadosa da areia da pasta hidratada com o auxílio dum peneiro de malha 106 μm . Para tal, a amostra de argamassa, depois de seca, foi desagregada, com o auxílio dum martelo de borracha, tendo-se passado o material através do peneiro de forma a separar a maior parte da areia.

O difractómetro utilizado nos ensaios foi o “Philips PW3710” com 35kV e 45mA, utilizando radiação $K\alpha$ de cobalto (comprimento de onda $\lambda=1.7903$ Å). Os difractograma foram registados entre 3° e 74° 2 θ , com incrementos de 0,05 °2 θ e 1s por incremento, em efeito 0.05 °2 θ s⁻¹.

3.6.9.2. Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG-ATD)

A análise termogravimétrica (TG) é uma técnica de análise térmica de caracterização de materiais que permite medir de forma contínua as variações de massa, em função da temperatura ou do tempo, de uma amostra que é aquecida (ou arrefecida) a uma velocidade de aquecimento (ou arrefecimento) constante. Qualquer reacção que implique uma perda de massa (desidratação, desidroxilação, descarbonatação) ou ganho de massa (hidratação, oxidação, carbonatação) pode ser quantificada. Muitos destes ganhos ou perdas de massa ocorrem em intervalos de temperatura que são característicos da presença de um determinado composto. Uma variante do método consiste em representar nas abcissas a derivada das variações de massa – análise termogravimétrica diferencial (dTG).

A análise térmica diferencial (ATD) é uma técnica de análise térmica em que são registadas as diferenças de temperatura entre uma substância e um material de referência (que não sofre quaisquer transformações na gama de temperatura do ensaio) em função do tempo ou da temperatura, quando as duas substâncias são submetidas a um mesmo ciclo de aquecimento. As diferenças de temperatura são causadas pela emissão ou absorção de calor da substância em análise (respectivamente, processos exotérmicos e endotérmicos). Assim, esta técnica não só pode detectar variações de massa (perdas por desidratação, descarbonatação, etc.), como também transformações estruturais, recristalizações, etc., que não produzem variações de massa mas que produzem a emissão ou absorção de calor. A curva ATD, além de ser característica para uma dada substância, o que a torna bastante útil na identificação de substâncias activas ao calor, permite a obtenção de dados quantitativos a partir das áreas integradas dos picos.

Os termogramas das amostras de argamassa foram efectuados num sistema de análise térmica, sob atmosfera inerte (árgon – 3 L/h), com velocidade de aquecimento uniforme de 10° C/min, desde a temperatura ambiente até 1000 °C.

Procedimento Experimental

As argamassas foram secas e desagregadas em pedaços até passarem pelo peneiro de abertura de malha 106 µm. A análise térmica simultânea foi realizada num analisador SETARAM TG-DTA 92, numa atmosfera de árgon, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, desde a temperatura ambiente até aos 1000°C. O conteúdo de portlandite livre nas amostras, foi determinado pela perda de massa no intervalo de 380 – 500°C, correspondente à desidroxilação da portlandite. O conteúdo de CO₂ presente nas amostras foi atribuído à perda de massa no intervalo de 500-850°C, que corresponde à descarbonatação da calcite (Gameiro et al., 2012).

Nas curvas de análise térmica simultânea é também comum apresentar a derivada das curvas TG (dTG), já que o início e fim das perdas de massa são mais perceptíveis.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos referentes às características das argamassas nos estados fresco e endurecido. Através de quadros serão apresentados os resultados dos ensaios, recorrendo-se também a gráficos para uma melhor interpretação e análise.

4.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

No quadro 4.1 são apresentados, para cada argamassa, os traços ponderais (considerando NHL:Mk:mistura de areias ou ligante:mistura de areias), relações água/ligante (considerando a relação entre água e NHL, assim como a relação entre água e o conjunto NHL e Mk) e os valores médios da consistência por espalhamento com os respectivos desvios-padrão.

Quadro 4.1 – Argamassas e suas designações, traços ponderais, relações água/ligante, espalhamento e respectivo desvio-padrão.

Arg.	Designação	Traço ponderal [NHL:Mk:Mist. Areia]	Traço ponderal [L:Mist.Areia]	Relação A/NHL	Relação A/(NHL+ Mk)	Esp. (mm)	D. P. (mm)
J1	Lm_Hc	1:0:5,1	1:5,1	1,1	1,1	175	5
J9	Lm_Hc_2	1:0:5,1	1:5,1	1,1	1,1	160	6
J2	Sm_Sc	1:0:5,1	1:5,1	1,1	1,1	174	9
J10	Sm_Sc_2	1:0:5,1	1:5,1	1,1	1,1	158	3
J3	Sm_Hc	1:0:5,1	1:5,1	1,1	1,1	147	5
J4	Sm_Hc_10Mk	1:0,11:5,7	1:5,1	1,2	1,1	143	4
J5	Sm_Sc_10Mk	1:0,11:5,7	1:5,1	1,2	1,1	139	3
J6	Lm_Hc_5Mk	1:0,05:5,4	1:5,1	1,1	1,1	149	3
J7	Lm_Hc_10Mk	1:0,11:5,7	1:5,1	1,2	1,1	139	2
J8	Lm_Hc_20Mk	1:0,25:6,4	1:5,1	1,4	1,1	130	0

4.1.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

No quadro III do Anexo II apresentam-se todos os valores de consistência por espalhamento obtidos, e no quadro 4.1 os valores médios por argamassa e respectivo desvio-padrão.

Comparativamente a ensaios realizados no LNEC para outros tipos de argamassas (Felgueiras, 2011; Massena, 2011), há indícios que o espalhamento realizado com a mesa utilizada, da FCT-UNL, corresponde a cerca de 10mm abaixo do valor expectável a registar com mesa de acordo com última versão da norma EN 1015-3 (CEN, 1999/2004/2006).

De acordo com a norma EN 1015-2 (CEN, 1999/2006a), para uma argamassa de massa volúmica na ordem de 2000 kg/m³ os valores de espalhamento deverão rondar os 170 mm, para garantir uma boa trabalhabilidade. Porém, esta indicação é genérica e não está adaptada a argamassas de diferentes

ligantes; em argamassas à base de cais, normalmente uma boa trabalhabilidade, é obtida com menores valores de consistência por espalhamento.

As argamassas J1 e J2 apresentaram um espalhamento mais elevado que o valor esperado, longe da gama de valores obtida para as restantes argamassas. Este facto foi a razão pela qual se optou por realizar uma repetição exacta destas argamassas (J9 e J10, respectivamente), para confirmação. Na repetição exacta das argamassas obtiveram-se valores substancialmente mais baixos. Como as argamassas J1 e J2 foram as primeiras argamassas realizadas na campanha e uma vez que os resultados dos restantes ensaios não diferiram entre as argamassas e a sua repetição (respectivamente J9 e J10), considera-se poder ter ocorrido algum factor, não detectado, na determinação dos dois primeiros valores de espalhamento. Passou a considerar-se como valor de consistência por espalhamento das argamassas Lm_Hc e Sm_Sc os valores de J9 e J10, respectivamente, e nos restantes ensaios os valores médios e desvio-padrão resultantes dos conjuntos das argamassas J1+J9 e J2+J10 (obtidos através do dobro dos provetes das restantes). Na figura 4.1 apresenta-se um gráfico com os valores de espalhamento obtidos, para uma melhor leitura e comparação.

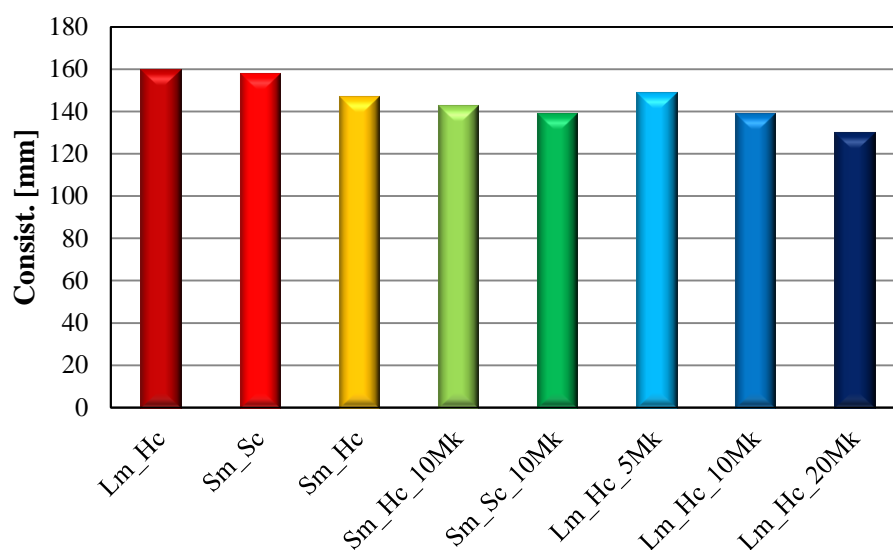


Figura 4.1 – Consistência por espalhamento das argamassas

No caso da argamassa Sm_Hc (J3), que é exactamente a mesma argamassa que a Sm_Sc (J10), apenas foi realizada nova amassadura para produção dos provetes necessários para colocação numa distinta condição de cura (no caso, húmida, em vez da concordante com a norma); verifica-se que o espalhamento obtido é inferior ao de Sm_Sc, e ainda mais baixo que Lm_Hc (J9), sendo esta última uma argamassa idêntica (em composição), mas com um tempo de amassadura mais prolongado. Os diferentes tempos de amassadura (Lm – tempo de mistura mais longo e, Sm – tempo de mistura standard, mais curto) poderão ter influenciado estes resultados. Por outro lado, essa influência do tempo de amassadura não foi notória na consistência de outras argamassas que diferem, também,

4. Apresentação e análise de resultados

apenas nesse aspecto, como é os casos das Sm_Hc_10Mk (J4) e Lm_Hc_10Mk (J7), onde se verificaram valores de espalhamento bastante próximos.

Nas argamassas Sm_Hc_10Mk (J4) e Sm_Sc_10Mk (J5), também elas exactamente iguais (tendo estado depois sujeitas a condições de cura distintas), com período de mistura segundo a norma (Sm) e 10% de massa de cal substituída por metacaulino, verifica-se que o espalhamento obtido para as duas argamassas foi muito próximo e um pouco inferior ao das argamassas só de cal.

É visível que a utilização do Mk induz a valores de espalhamento mais baixos, com tendência a decrescer à medida que a presença de metacaulino aumenta, como se pode verificar nas argamassas J6, J7 e J8 (Lm_Hc_5Mk/10Mk/20Mk). Comparando argamassas que diferem apenas na presença ou não de Mk, como a Lm_Hc com qualquer uma das Lm_Hc_5Mk/10Mk/20Mk, ou a argamassa Sm_Sc com a Sm_Sc_5Mk, essa situação é também facilmente identificada.

4.2. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Todos os valores obtidos resultam da média de 3 provetes por argamassa, com a excepção das argamassas J1, J9 (Lm_Hc) e J2, J10 (Sm_Sc) cujos provetes, por se tratarem de argamassas exactamente iguais, foram agrupados, perfazendo uma amostra de 6 provetes para cada uma.

São apresentados no quadro 4.2, para todas as argamassas, os resultados médios obtidos de todos os ensaios e respectivos desvios-padrão, aos 28 e 90 dias de idade: módulo de elasticidade dinâmico (Ed); resistências à tracção por flexão (Rt) e à compressão (Rc); porosidade aberta (Pab); perda de massa das argamassas no ensaio de resistência aos sulfatos, ao fim do 20º ciclo (R. Sulf.) – quando a perda de massa foi total antes do 20º ciclo é indicado o ciclo em que ocorreu; absorção de água por capilaridade através do coeficiente de capilaridade (C.C.) e do valor assintótico (V.A.); índice de secagem (I.S.); coeficiente de condutibilidade térmica (λ).

4. Apresentação e análise de resultados

Quadro 4.2 – Resultados e respectivos desvios-padrão de todos os ensaios realizados a todas as argamassas, aos 28 e 90 dias de idade.

Ensaio	Idade e D.P.	Argamassas							
		J1+J9	J2+J10	J3	J4	J5	J6	J7	J8
		Lm_Hc	Sm_Sc	Sm_Hc	Sm_Hc_10Mk	Sm_Sc_10Mk	Lm_Hc_5Mk	Lm_Hc_10Mk	Lm_Hc_20Mk
Ed (MPa)	28d	4256	2191	4156	7693	1991	7612	8946	4044
	D.P.	115	245	174	491	166	172	573	73
	90d	3694	1690	4284	4445	1499	4720	4260	3523
	D.P.	199	114	209	213	44	173	145	71
Rt (MPa)	28d	0,52	0,29	0,39	0,61	0,28	0,53	0,79	0,45
	D.P.	0,10	0,03	0,04	0,04	0,02	0,00	0,07	0,02
	90d	0,37	0,14	0,40	0,35	0,12	0,61	0,48	0,59
	D.P.	0,10	0,05	0,30	0,09	0,07	0,02	0,11	0,04
Rc (MPa)	28d	0,92	0,43	0,86	2,56	1,68	1,91	2,92	1,99
	D.P.	0,06	0,09	0,08	0,16	0,17	0,11	0,23	0,09
	90d	1,23	0,38	1,28	2,34	1,08	2,32	2,38	2,32
	D.P.	0,27	0,03	0,04	0,18	0,10	0,02	0,17	0,12
Pab (%)	28d	28,0	26,5	27,9	28,7	29,3	28,4	28,7	29,5
	D.P.	0,7	0,7	0,5	0,6	0,3	0,2	0,6	0,3
	90d	32,1	35,6	30,1	32,3	32,6	34,6	33,6	34,7
	D.P.	5,1	4,2	1,3	1,3	0,6	0,0	3,0	0,7
R. Sulf. (% perda massa 20º ciclo)	Prov. 28d ⁽¹⁾	-92,1	-100 ^(13º)	-100 ^(17º)	-64,5	-60,3	-65,2	-63,7	-70,4
	D.P.	12,3	0,0	0,0	0,7	2,1	6,7	2,7	8,7
	Prov. 90d ⁽¹⁾	-70,1	-100 ^(14º)	-81,6	-100 ^(16º)	-66,6	-100 ^(17º)	-100 ^(17º)	-69,8
	D.P.	4,1	0,0	16,4	0,0	2,2	0,0	0,0	6,8
C.C. (kg/m². min ^{0,5})	28d	1,92	2,28	1,97	1,14	1,55	1,40	1,17	1,50
	90d	1,57	3,63	1,76	1,23	2,42	1,33	2,32	2,76
V.A. (kg/m²)	28d	20,63	19,91	20,27	21,68	21,76	21,18	21,60	23,55
	90d	22,48	21,61	20,47	23,72	24,61	23,96	24,23	23,97
I.S. (-)	28d	0,38	0,34	0,39	0,41	0,39	0,40	0,41	0,42
	D.P.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
	90d	0,32	0,23	0,29	0,35	0,32	0,34	0,37	0,41
	D.P.	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Cond. Térm. (W/mK)	$\lambda^{(2)}$	0,687	0,650	0,705	0,697	0,646	0,728	0,704	0,623
	D.P.	0,053	0,037	0,018	0,014	0,022	0,040	0,026	0,022

⁽¹⁾ O ensaio foi realizado aos 130 dias de idade aos provetes que anteriormente foram ensaiados aos 28 e 90 dias, e que permaneceram, desde então e até ao início do ensaio, na sala de cura de referência.

⁽²⁾ O ensaio foi realizado aos 120 dias de idade aos provetes que anteriormente foram ensaiados aos 28 dias e que permaneceram, desde então e até ao início do ensaio, na sala de cura de referência.

4. Apresentação e análise de resultados

4.2.1. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

4.2.1.1. Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) traduz-se na rigidez das argamassas, permitindo aferir a deformabilidade das mesmas; quanto mais rígida a argamassa (maiores valores de E_d) menos deformável será.

Para uma melhor compreensão e análise, são apresentados na figura 4.2 os resultados do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) para todas as argamassas nas duas idades em estudo: 28 e 90 dias.

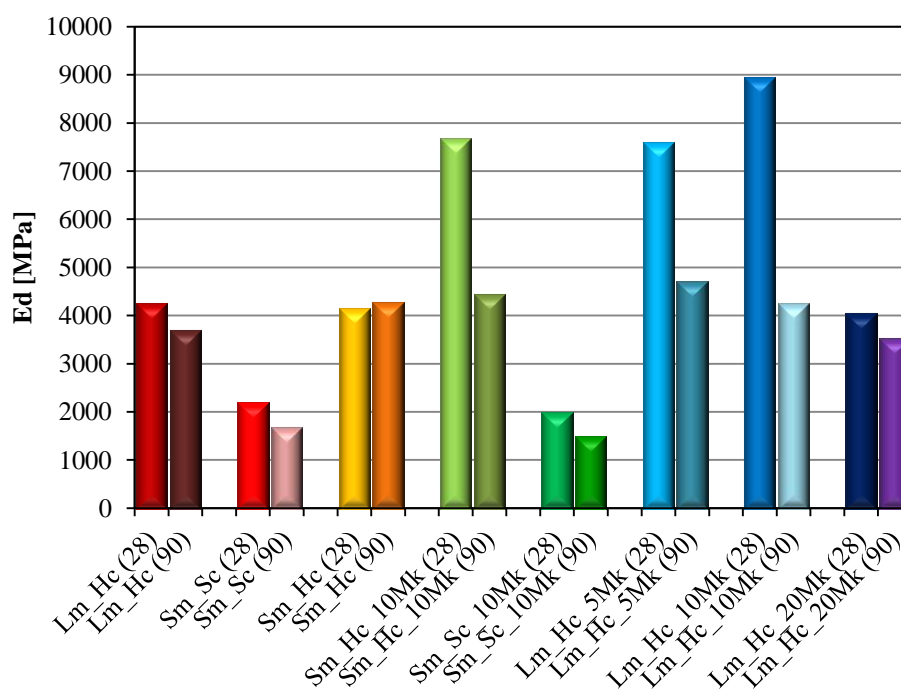


Figura 4.2 – Módulo de elasticidade dinâmico de todas as argamassas aos 28 e 90 dias.

Analisando a figura 4.2, verifica-se que o maior valor de E_d atingiu-se aos 28 dias, para a argamassa Lm_Hc_10Mk, e o menor valor foi obtido na argamassa Sm_Sc_10Mk, aos 90 dias. É também visível que as argamassas sujeitas à cura húmida (Hc) apresentam, na sua maioria, valores bastante mais elevados aos 28 dias do que aos 90 (apenas se verifica o contrário, com um ligeiro incremento aos 90 dias, no caso da Sm_Hc), não se verificando essa discrepância no caso das argamassas de cura de referência (Sc), que, contudo apresentaram também, valores de E_d inferiores aos 90 dias. Sendo a humidade um factor que tem influência directa na determinação de E_d (Faria, 2004), os valores mais elevados que se obtiveram para as argamassas de cura Hc, poderão estar relacionados com esse facto, principalmente na altura de ensaio à idade mais jovem, uma vez que os provetes destas argamassas apresentaram-se húmidos no seu interior, como já foi referido e pode ser observado na figura 3.7, relativa ao ensaio de resistência à tracção por flexão.

Para melhor averiguar a influência das diferentes curas, apresentam-se, isoladamente, na figura 4.3 os resultados de E_d das argamassas que diferem apenas nesse aspecto, nas duas idades estudadas.

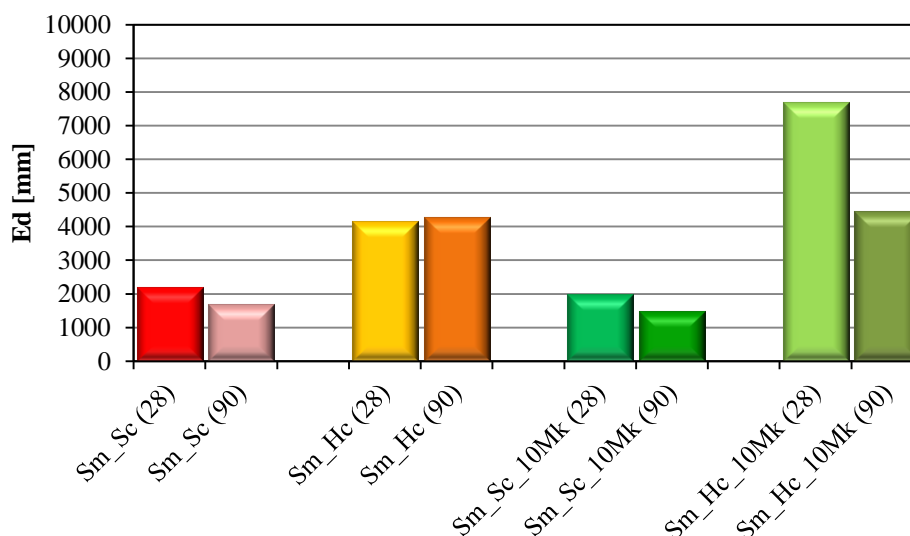


Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de cura standard (Sc) e húmida (Hc), aos 28 e 90 dias.

Facilmente se verifica que, independentemente da idade de ensaio, a cura húmida contribui para valores mais elevados de E_d do que a cura standard nestas argamassas, existindo um decréscimo dos 28 para os 90 dias; ligeiro no caso das Sm_Sc e Sm_Sc_10Mk e bastante acentuado no caso da argamassa de cura húmida com 10% de Mk. A exceção dá-se na Sm_Hc, em que se verifica um aumento de E_d , embora pouco acentuado, dos 28 para os 90 dias de idade.

De modo a analisar se o tempo de mistura teve, ou não, alguma influência nos resultados de E_d , apresentam-se na figura 4.4 somente as argamassas que diferem nesse factor.

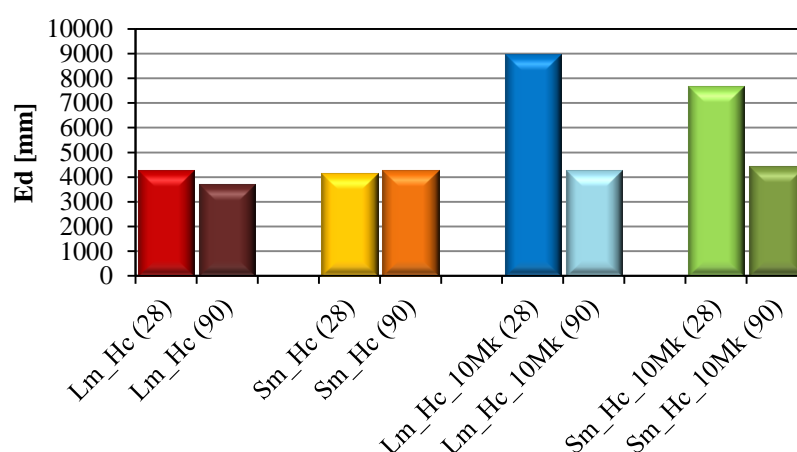


Figura 4.4 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com tempo de amassadura standard (Sm) e mais prolongado (Lm), aos 28 e 90 dias.

4. Apresentação e análise de resultados

Verifica-se que os valores obtidos são muito próximos, existindo uma diferença relativamente notória apenas no caso das argamassas com a presença de metacaulino, sendo a de mistura mais prolongada, aos 28 dias, mais rígida.

Com o intuito de averiguar a influência do metacaulino nos resultados de Ed, na figura 4.5 são apresentadas as argamassas Lm_Hc com os diferentes teores de Mk (0%, 5%, 10% e 20%), aos 28 e 90 dias.

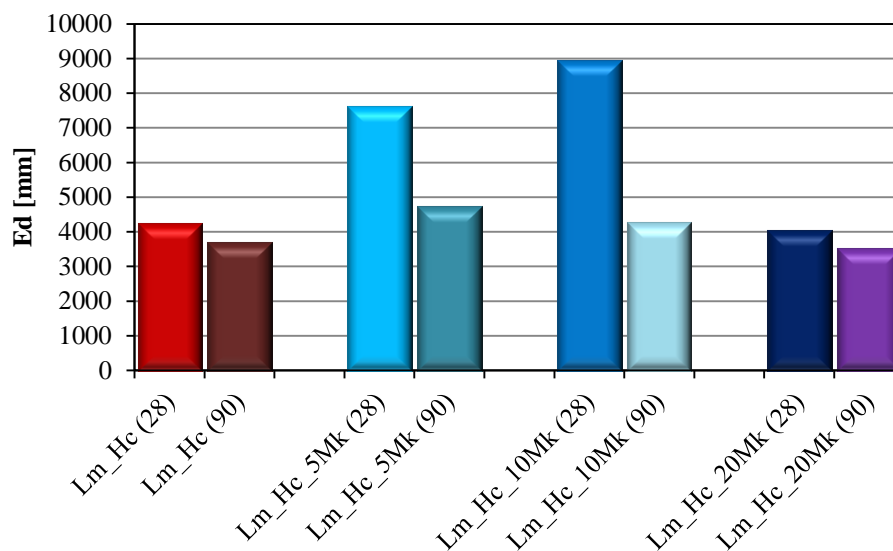


Figura 4.5 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com e sem substituição parcial de Mk por NHL, aos 28 e 90 dias.

De acordo com a figura 4.5 a presença de metacaulino nas argamassas provocou um incremento considerável na rigidez das mesmas, aos 28 dias de ensaio, progredindo com o aumento da massa de Mk, em substituição parcial da cal, até aos 10%, verificando-se um retrocesso na Lm_Hc_20Mk, para valores ligeiramente mais baixos que os verificados na argamassa com 0% de Mk.

Aos 90 dias, embora com diferenças efectivamente menos substanciais, verifica-se um aumento de Ed da Lm_Hc para a Lm_Hc_5Mk, diminuindo um pouco para a Lm_Hc_10Mk (sendo ainda assim, maior que na argamassa sem Mk) e decrescendo um pouco mais na Lm_Hc_20Mk, para valores ligeiramente inferiores ao da Lm_Hc.

Nestas condições de cura, com elevados teores de humidade relativa ($90\pm 5\%$), que contribui, à partida, para uma maior reacção pozolânica, era expectável este aumento do módulo de elasticidade das argamassas com Mk.

4.2.1.2. Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão

Os resultados de Rt e de Rc obtidos são apresentados nos quadros VI e VII do Anexo II e no quadro 4.2 registam-se os valores médios de cada argamassa e respectivo desvio-padrão.

4. Apresentação e análise de resultados

Importa avaliar os resultados mecânicos obtidos em conjunto, e como tal, com o auxílio das figuras 4.6 e 4.7, começa-se por analisar as resistências mecânicas das argamassas (Rt e Rc) em conjunto com o módulo de elasticidade dinâmico (Ed), aos 28 e 90 dias, respectivamente.

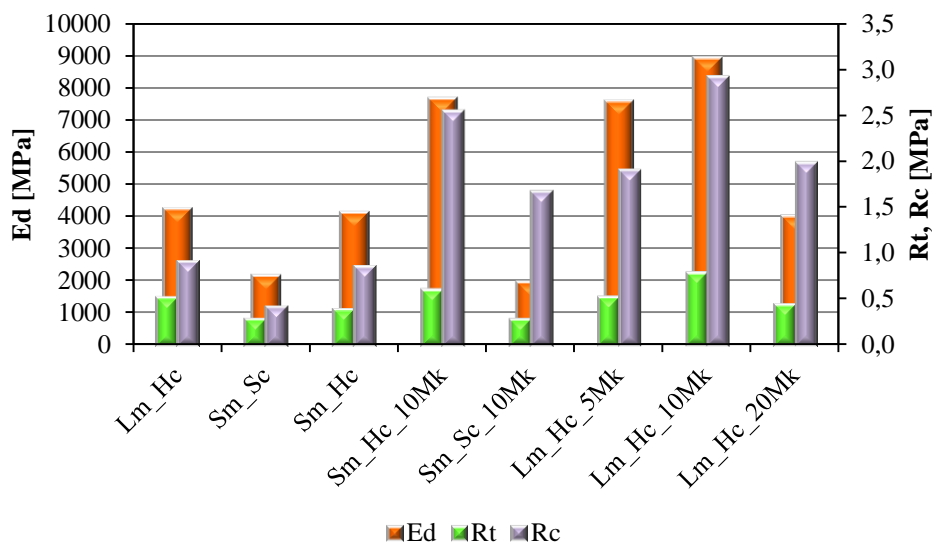


Figura 4.6 – Módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas das argamassas aos 28 dias.

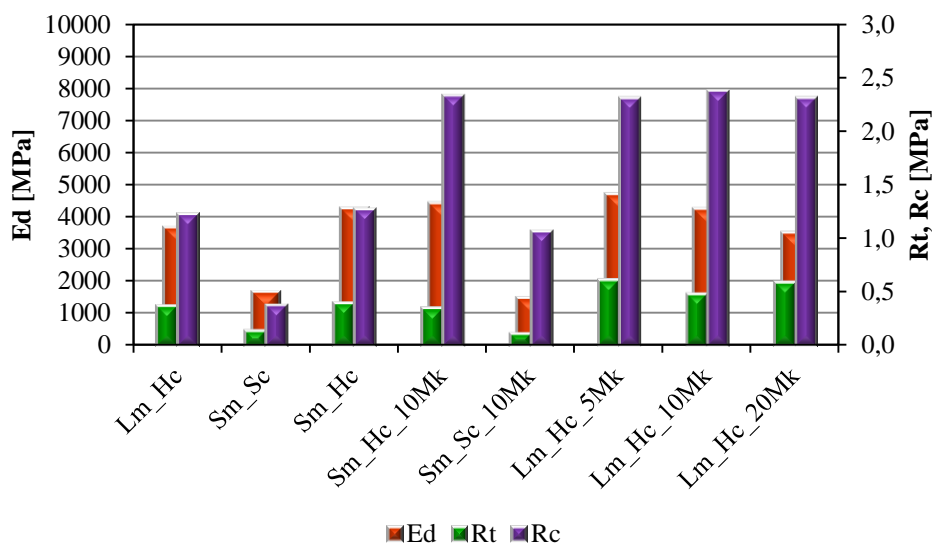


Figura 4.7 – Módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas das argamassas aos 90 dias.

Analisando a figura 4.6, referente aos 28 dias de idade das argamassas, constata-se que os parâmetros em análise apresentam uma boa proporcionalidade. Já no caso dos 90 dias, pela figura 4.7, verifica-se que existe ainda proporcionalidade, mas não tão coerente, principalmente no caso das argamassas Lm_Hc_5/10/20Mk, em que se verifica um decréscimo de Ed e Rt, com o aumento da

4. Apresentação e análise de resultados

percentagem de Mk, enquanto os valores de Rc para as 3 argamassas variam muito pouco e na ordem inversa; da Lm_Hc_5Mk para a Lm_Hc_10Mk estes parâmetros aumentam ligeiramente, da mesma maneira que voltam a diminuir para a Lm_Hc_20Mk.

Tendo em conta a utilização das argamassas em edifícios antigos, em termos de resistências mecânicas, interessa que estas sejam suficientemente elevadas para aplicação no refechamento de juntas ou em rebocos, mas não demasiado para não provocarem o desenvolvimento de tensões que ponham em causa todo o conjunto da alvenaria (Faria et al., 2012c). De acordo com estudos realizados (Veiga et al., 2010), podem-se estabelecer requisitos mínimos e máximos de características mecânicas para esse tipo de utilização. Segundo os autores (Veiga et al., 2010), para uma boa compatibilidade mecânica com edifícios antigos as argamassas deverão apresentar, aos 90 dias de idade, valores de acordo com o apresentado no quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Características mecânicas, aos 90 dias, de argamassas para aplicação em edifícios antigos (com base em Veiga et al., 2010).

	Ed [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]
Rebocos	2000 - 5000	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5
Juntas	3000 - 5000	0,4 - 0,8	0,6 - 3

Analisando a figura 4.7, referente aos resultados obtidos aos 90 dias, e tendo em conta os valores estipulados no quadro 4.3, constata-se que a maioria das argamassas seriam adequadas, tanto para utilização em rebocos, como em refechamento de juntas de edifícios antigos. As únicas exceções são as argamassas de cura de referência (Sc): Sm_Sc, em que nenhum dos parâmetros analisados atinge os mínimos necessários, e Sm_Sc_10Mk, na qual apenas o valor de Rc (1,08 MPa) se encontra dentro da gama estabelecida pelos autores (Veiga et al., 2010), enquanto Ed e Rt não cumprem os mínimos.

Através da figura 4.8, onde são apresentados os resultados de Rt e Rc aos 28 e 90 dias, pretende-se agora, analisar os resultados entre as duas idades. Os ensaios tiveram lugar na FCT-UNL aos 28 dias, e no LNEC aos 90 dias, com equipamentos, células de carga e velocidades diferentes, como já foi anteriormente referido.

Analisando a figura 4.8, verifica-se que, a argamassa Lm_Hc_10Mk foi a que apresentou os valores mais elevados de Rt e Rc, em ambos os casos aos 28 dias. Aquela que piores resultados apresentou (valores muito baixos) foi a Sm_Sc, aos 90 dias, tendo apenas sido superior à sua semelhante mas com 10% de Mk (Sm_Sc_10Mk) nos resultados obtidos de Rt à mesma idade.

Os resultados de Rt diminuíram dos 28 para os 90 dias para todas as argamassas - com excepção das Lm_Hc_5Mk/20Mk, onde sucedeu o contrário, e da Sm_Hc, que não demonstrou praticamente nenhuma alteração de uma idade para outra.

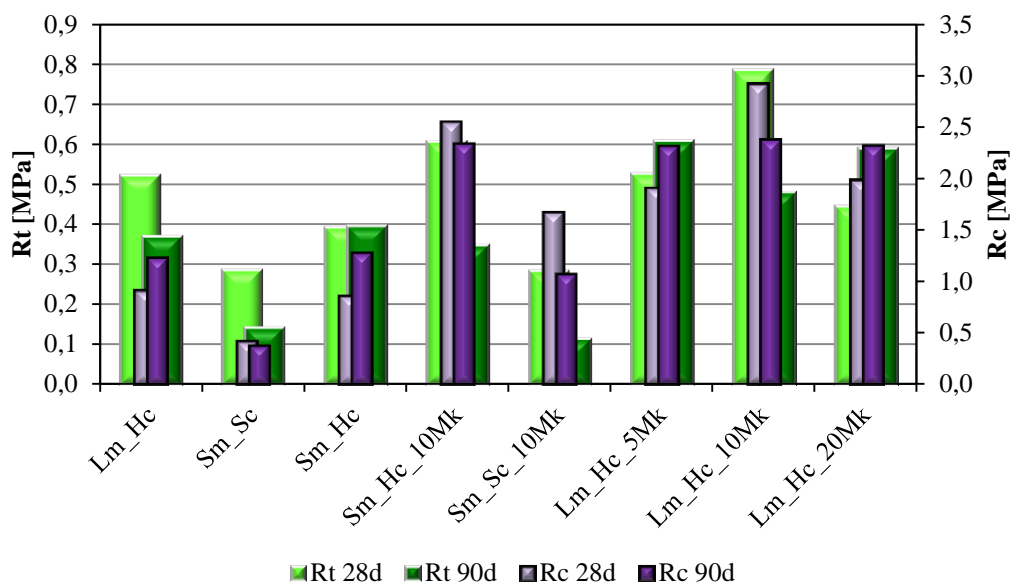


Figura 4.8 – Resistências mecânicas das argamassas aos 28 e 90 dias.

No caso da resistência à compressão, para as argamassas de cura húmida verifica-se um aumento dos 28 para os 90 dias - exceptuando as Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk, onde se constata o inverso, e nas argamassas de cura Sc verifica-se um decréscimo dos 28 para os 90 dias; muito ligeiro no caso da Sm_Sc e mais acentuado no caso da Sm_Sc_10Mk.

Para melhor aferir a influência das diferentes curas, apresentam-se na figura 4.9 os resultados de Rt e Rc para as argamassas que diferem apenas nesse parâmetro, nas duas idades ensaiadas.

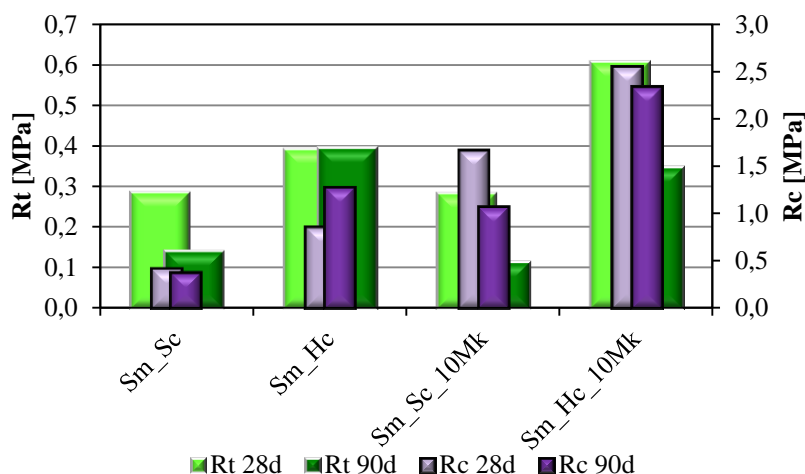


Figura 4.9 – Resistências mecânicas das argamassas de cura standard (Sc) e húmida (Hc) aos 28 e 90 dias.

Pela análise da figura 4.9, facilmente se constata que as argamassas de cura húmida apresentaram valores de Rt e Rc substancialmente superiores, comparativamente às de cura de referência, em ambas as idades.

4. Apresentação e análise de resultados

De modo a poder averiguar a possível influência do tempo de amassadura das argamassas nas resistências mecânicas, apresenta-se na figura 4.10 os resultados de R_t e R_c das argamassas que diferem apenas nesse aspecto, aos 28 e 90 dias.

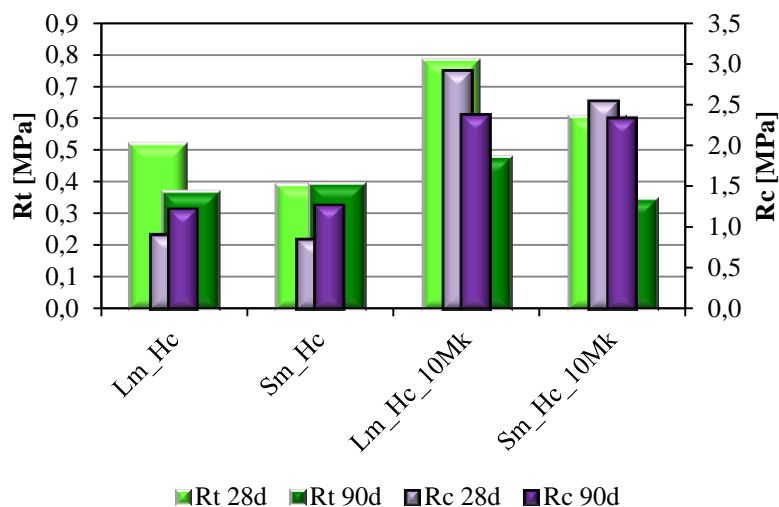


Figura 4.10 – Resistências mecânicas das argamassas com tempo de amassadura longo (Lm) e mais curto (Sm) aos 28 e 90 dias.

Analisando a figura 4.10, não se verifica uma alteração considerável dos valores obtidos aos 90 dias de idade entre as argamassas de Lm e Sm; somente um decréscimo de R_t da Lm_Hc_10Mk para a Sm_Hc_10Mk. No entanto, para a idade mais jovem, os resultados são superiores nas argamassas de tempo de amassadura mais longo, com exceção de R_c para as argamassas sem metacaulino, que permaneceu muito inalterável.

Na figura 4.11 são apresentados os resultados das resistências mecânicas das argamassas com diferentes teores de Mk, em substituição parcial do ligante (Lm_Hc e Lm_Hc_5Mk/10Mk/20Mk), nas duas idades ensaiadas.

Com a crescente percentagem de Mk verifica-se um aumento de R_c aos 28 dias de idade, atingindo o máximo na argamassa com 10% de Mk. Para a argamassa com 20% de Mk, verifica-se um decréscimo de R_c para valores praticamente idênticos aos da Lm_Hc_5Mk (ainda assim superiores aos de Lm_Hc). No caso dos ensaios aos 90 dias, a presença de Mk incrementa os valores de R_c , mantendo-se inalteráveis com o aumento da percentagem de Mk.

A resistência à tracção das argamassas com diferentes teores de Mk, aos 28 dias, é semelhante entre a Lm_Hc e a Lm_Hc_5Mk, verificando-se para a Lm_Hc_10Mk uma diferença considerável, para valores mais elevados, e para Lm_Hc_20Mk um pouco inferiores ao da argamassa sem presença de Mk. Aos 90 dias constata-se um aumento de R_t com a presença de metacaulino: da Lm_Hc para a Lm_Hc_5Mk, menos considerável para a Lm_Hc_10Mk, e ao nível da argamassa com 5% de Mk, para a Lm_Hc_20Mk.

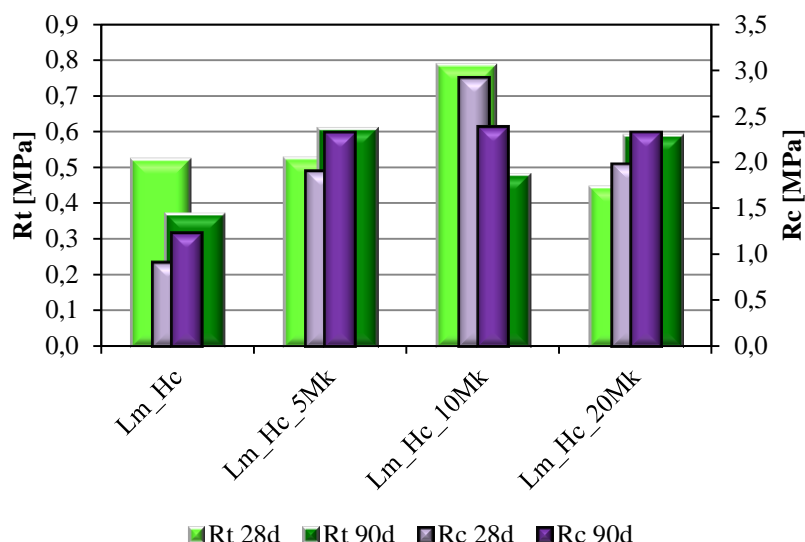


Figura 4.11 – Resistências mecânicas das argamassas com diferentes teores de metacaulino, aos 28 e 90 dias.

4.2.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio foi realizado aos 28 e 90 dias de idade aos meios provetes das argamassas. Como referido anteriormente, os meios provetes tiveram uma preparação diferente nas duas alturas de ensaio, sendo que, aos 90 dias, optou-se por revestir os provetes a ensaiar com película aderente em todas as faces laterais, deixando a descoberto tanto a base como o topo, e utilizou-se também uma rede de gaze onde se apoiaram os provetes, fixa com um elástico. Aos 28 dias não se utilizou qualquer acessório.

Em termos de comportamento face à água interessa que o valor total de água absorvida (VA) seja o menor possível, assim como o coeficiente de capilaridade (CC), para que a velocidade a que começa a ocorrer a absorção capilar seja reduzida (Faria et al., 2012c).

Os resultados obtidos são apresentados no quadro 4.2, onde são expressos o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico das argamassas. As figuras 4.12 e 4.13 apresentam, respectivamente, os gráficos de capilaridade obtidos e a fase inicial de ensaio, para todas as argamassas nas duas idades ensaiadas (A – 28 dias; B – 90 dias).

4. Apresentação e análise de resultados

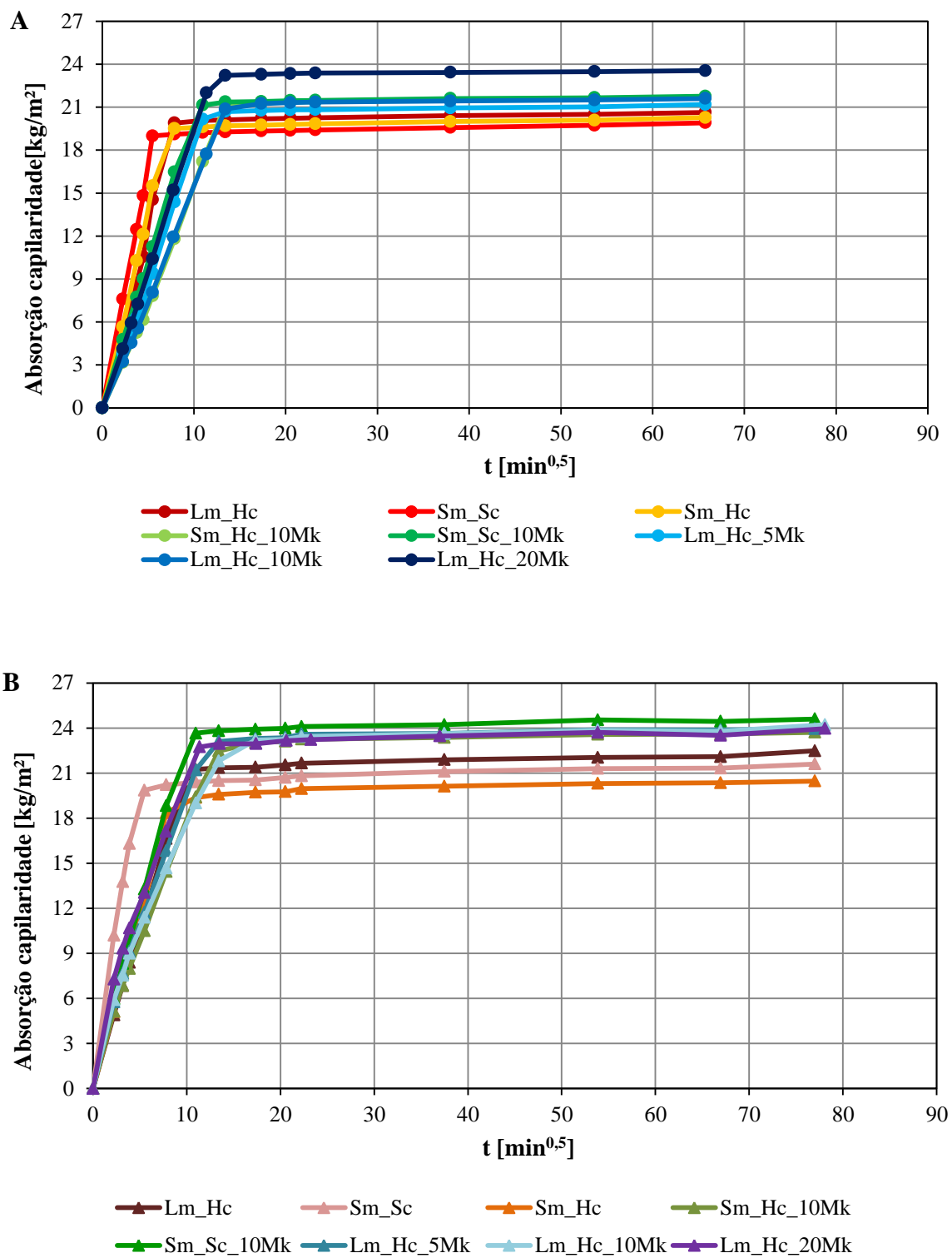
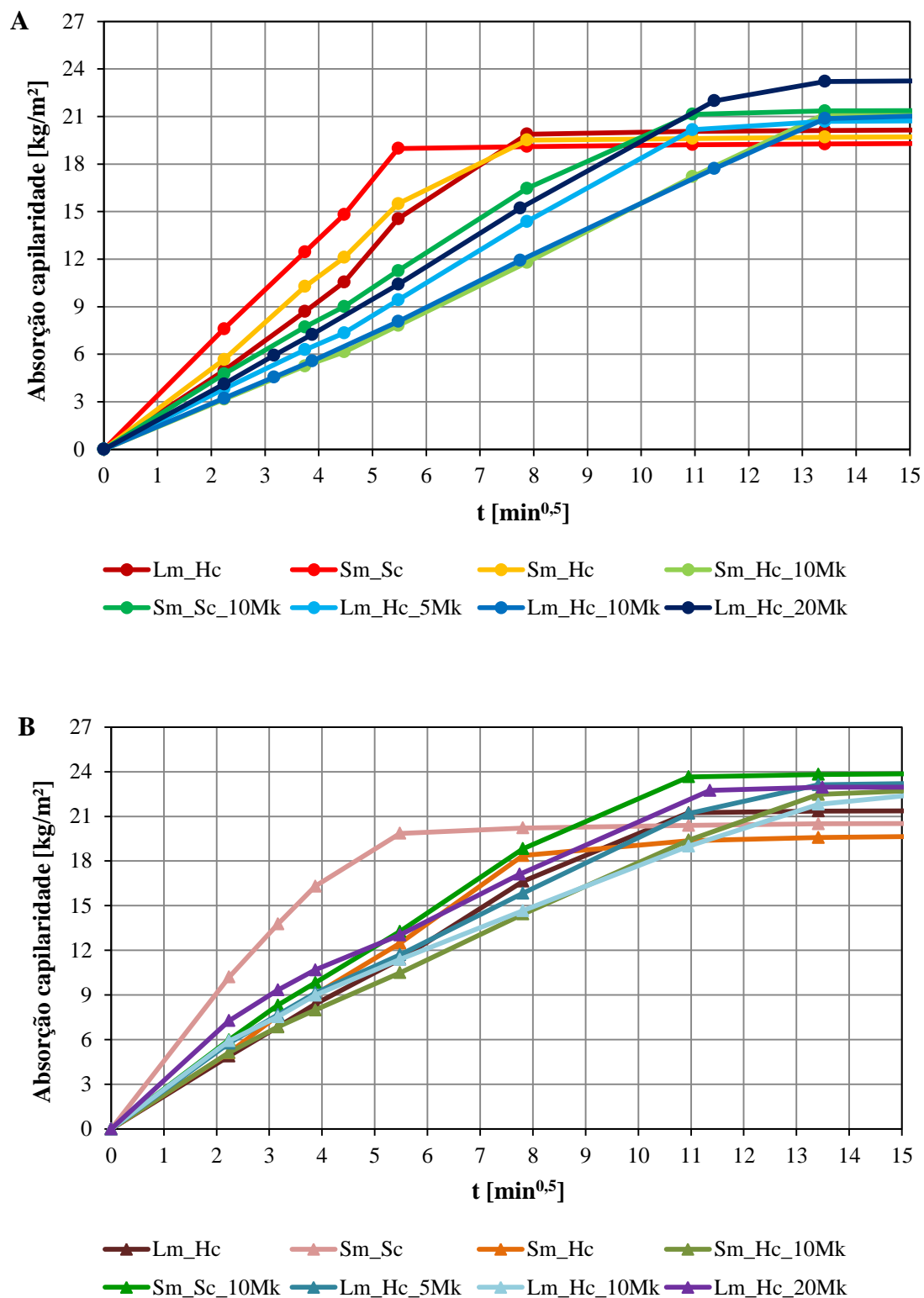


Figura 4.12 – Curvas de absorção de água por capilaridade
A – 28 dias; B – 90 dias.



4. Apresentação e análise de resultados

Pela análise da figura 4.12 verifica-se que se obtiveram valores assintóticos semelhantes em todas as argamassas, com uma ligeira diferença para valores superiores, no caso das argamassas com maiores quantidades de pozolana, especialmente, aos 90 dias. Aos 28 dias, apenas aquela com maior percentagem de metacaulino (Lm_Hc_20Mk) se destaca das restantes.

Em relação ao coeficiente de capilaridade, através da figura 4.13 verifica-se que a Sm_Sc foi a argamassa que apresentou um maior valor, tanto aos 28 como aos 90 dias, sendo neste último superior. Os melhores resultados foram obtidos aos 28 dias, pelas argamassas de cura húmida com 10% de Mk, Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk, que apresentaram os valores mais baixos de CC. As restantes argamassas, com valores intermédios, apresentaram um CC semelhante.

Com as figuras 4.14, 4.15 e 4.16, apresentam-se, isoladamente, as curvas de algumas argamassas de modo a permitir uma melhor análise da possível influência das diferentes curas, tempo de amassadura e substituição de cal por Mk, respectivamente.

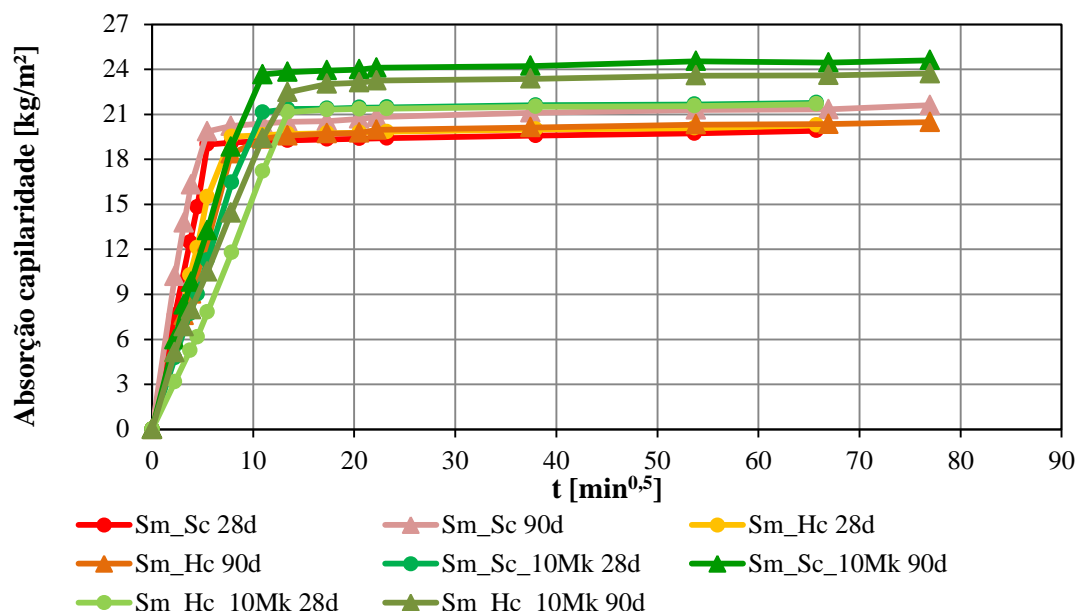


Figura 4.14 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas com tempo de mistura standard de curas standard ou húmida, aos 28 e 90 dias.

Através da figura 4.14, constata-se que, de entre as argamassas com tempo de mistura standard sem adição de pozolana, tanto aos 28 como 90 dias, as de cura Hc apresentam um coeficiente de capilaridade inferior aos das argamassas de cura Sc, mas ao nível de VA os valores são muito próximos. No caso das argamassas com 10% de Mk, a tendência mantém-se e as argamassas de cura húmida apresentam melhores valores de CC. Aos 28 dias de idade, o VA é idêntico entre estas argamassas, atingindo valores relativamente superiores aos 90 dias, sendo a argamassa de cura Sc aquela que apresenta o maior valor.

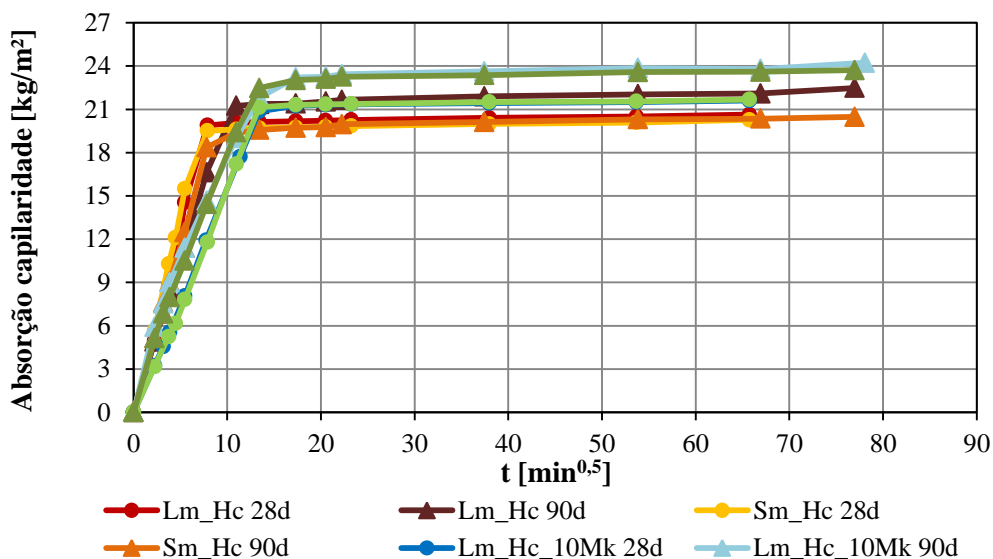


Figura 4.15 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas de cura húmida de mistura curta Sm, ou prolongada Lm, aos 28 e 90 dias

Comparando as argamassas com diferentes tempos de amassadura com cura húmida, pela análise da figura 4.15, verifica-se que, nas duas idades de ensaio, as argamassas apresentaram resultados muito próximos, tanto a nível de CC como de VA, não se verificando uma influência directa do tempo de amassadura. A única diferença relevante verifica-se aos 90 dias, para a Lm_Hc que apresenta um VA superior ao de Sm_Hc.

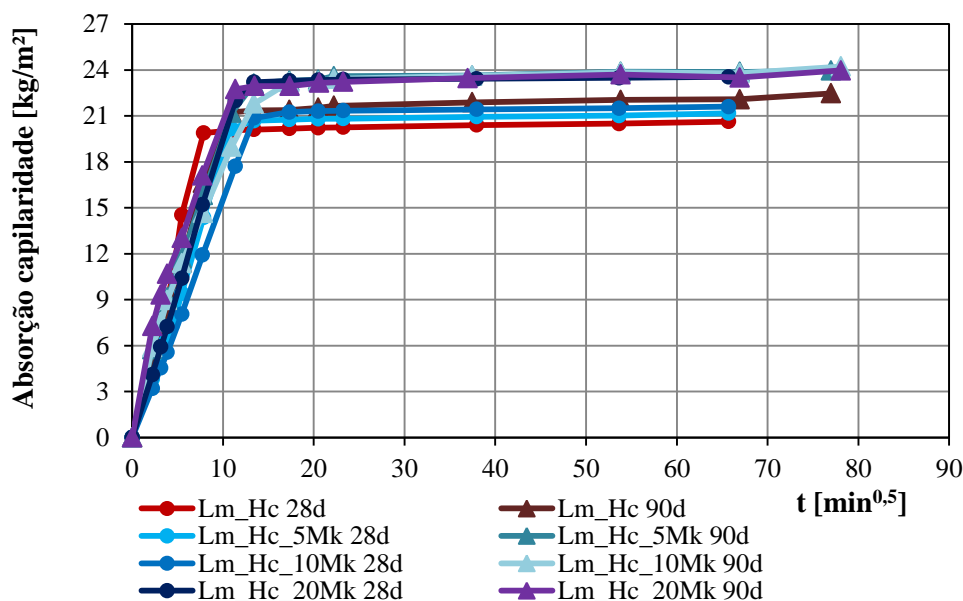


Figura 4.16 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas Lm_Hc com diferentes teores de Mk, aos 28 e 90 dias

4. Apresentação e análise de resultados

Analisando a figura 4.16, verifica-se que as argamassas com Mk tiveram uma absorção de água mais lenta (menor CC) que a argamassa só com cal. A Lm_Hc aos 28 dias destaca-se claramente das restantes, com um maior valor de CC, mas apresenta, contudo, o menor VA.

Aos 90 dias as argamassas absorveram uma maior quantidade de água do que aos 28 dias, excepto a Lm_Hc_20Mk, que aos 28 dias apresentou um VA praticamente igual ao atingido para a mesma argamassa à data de ensaio mais tardio.

Aos 28 dias verifica-se uma proporção entre o aumento da percentagem de Mk e o decréscimo de CC até aos 10% de Mk, atingindo-se para esta argamassa o valor mais baixo. O CC registado para a argamassa com maior percentagem de Mk foi um pouco superior, mas ainda assim inferior ao do registado para a argamassa sem a presença da pozolana. O mesmo não se verificou aos 90 dias, tendo havido um decréscimo de CC da Lm_Hc para a Lm_Hc_5Mk, mas os valores das outras duas já foram superiores, crescendo com o aumento de Mk.

A figura 4.17 apresenta, agora, os resultados dos coeficientes de capilaridade em conjunto com os valores assintóticos obtidos em todas as argamassas, nas duas idades de ensaio.

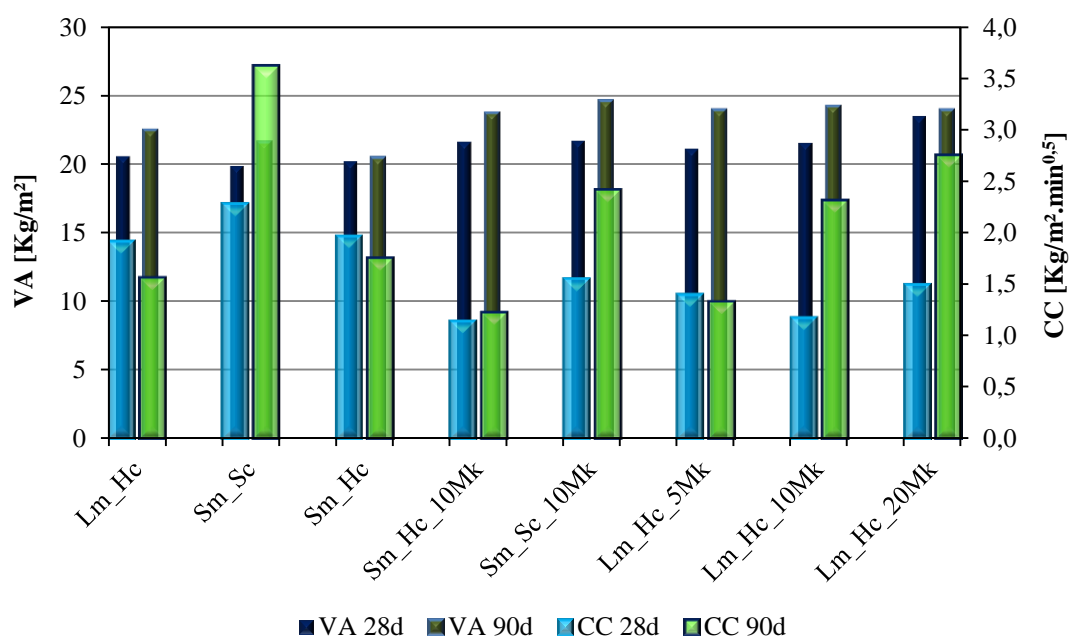


Figura 4.17 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade das argamassas aos 28 e 90 dias

Observando a figura 4.17 é notório que, aos 28 dias, a presença de Mk diminui a velocidade de absorção de água, tendo-se obtido os menores valores nas argamassas com 10% de Mk em substituição da cal (Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk). No entanto verificou-se um aumento de CC, aos 90 dias, na maioria das argamassas, embora muito reduzido na Sm_Hc_10Mk. A Lm_Hc_5Mk registou inclusive um ligeiro decréscimo sendo a excepção nas argamassas com pozolana, juntando-se às Lm_Hc e Sm_Sc nos casos em que o CC diminuiu dos 28 para os 90 dias.

Relativamente à quantidade total de água absorvida, é visível que o Mk incrementou um pouco esses valores nas duas idades. O VA foi muito próximo entre as argamassas sem metacaulino, assim como aconteceu nas argamassas com metacaulino, contudo, num patamar de valores um pouco superior. A diferente percentagem parece, assim, não ter tido influência no VA das argamassas, com valores obtidos praticamente iguais. É de notar, apenas, que a argamassa com maior percentagem de Mk obteve um valor de VA mais próximo entre as duas idades, comparativamente com as restantes argamassas com pozolana.

4.2.3. SECAGEM

O ensaio de secagem decorreu na sala de cura de referência (Sc), imediatamente após a realização do ensaio de capilaridade, nas diferentes condições que os meios provetes tinham para cada uma das datas (preparações dos provetes diferentes aos 28 e 90 dias). No ensaio dos 90 dias de idade foi retirada a rede em gaze que cobria a base dos provetes, assim como o elástico, ficando apenas a película aderente a envolver os meios provetes.

Apresentam-se os resultados no quadro 4.2, onde estão registados os valores do índice de secagem, e na figura 4.18 apresentam-se as curvas de secagem obtidas, para todas as argamassas nas duas idades ensaiadas (A – 28 dias; B – 90 dias).

Analisando a figura 4.18, das curvas de evaporação de água das argamassas, é evidente que aos 90 dias (fig. 4.18-B), o ensaio foi bastante mais demorado quando comparado com o sucedido aos 28 dias de idade das argamassas (fig. 4.18-A). O facto de os provetes ensaiados mais tarde estarem envoltos em película aderente, dita a razão desta diferença bastante significativa, tendo provocado um tempo de secagem mais prolongado em todas as argamassas. Tal facto deve-se à película envolvente implicar uma secagem apenas unidireccional, pelo topo dos provetes.

O comportamento das argamassas é semelhante, com velocidades de secagem muito próximas. É de notar, no entanto, que a presença de metacaulino, em substituição parcial da cal, parece ditar um tempo de secagem mais lento, identificando-se na figura 4.18, em ambas as idades, a argamassa com maior teor em Mk (Lm_Hc_20Mk) como a que mais tempo demorou a atingir os valores mais baixos de teor em água. Por outro lado, o destaque para a mais rápida evaporação de água vai para a argamassa sem metacaulino, de mistura curta e cura de referência (Sm_Sc), novamente, nas duas idades de ensaio.

4. Apresentação e análise de resultados

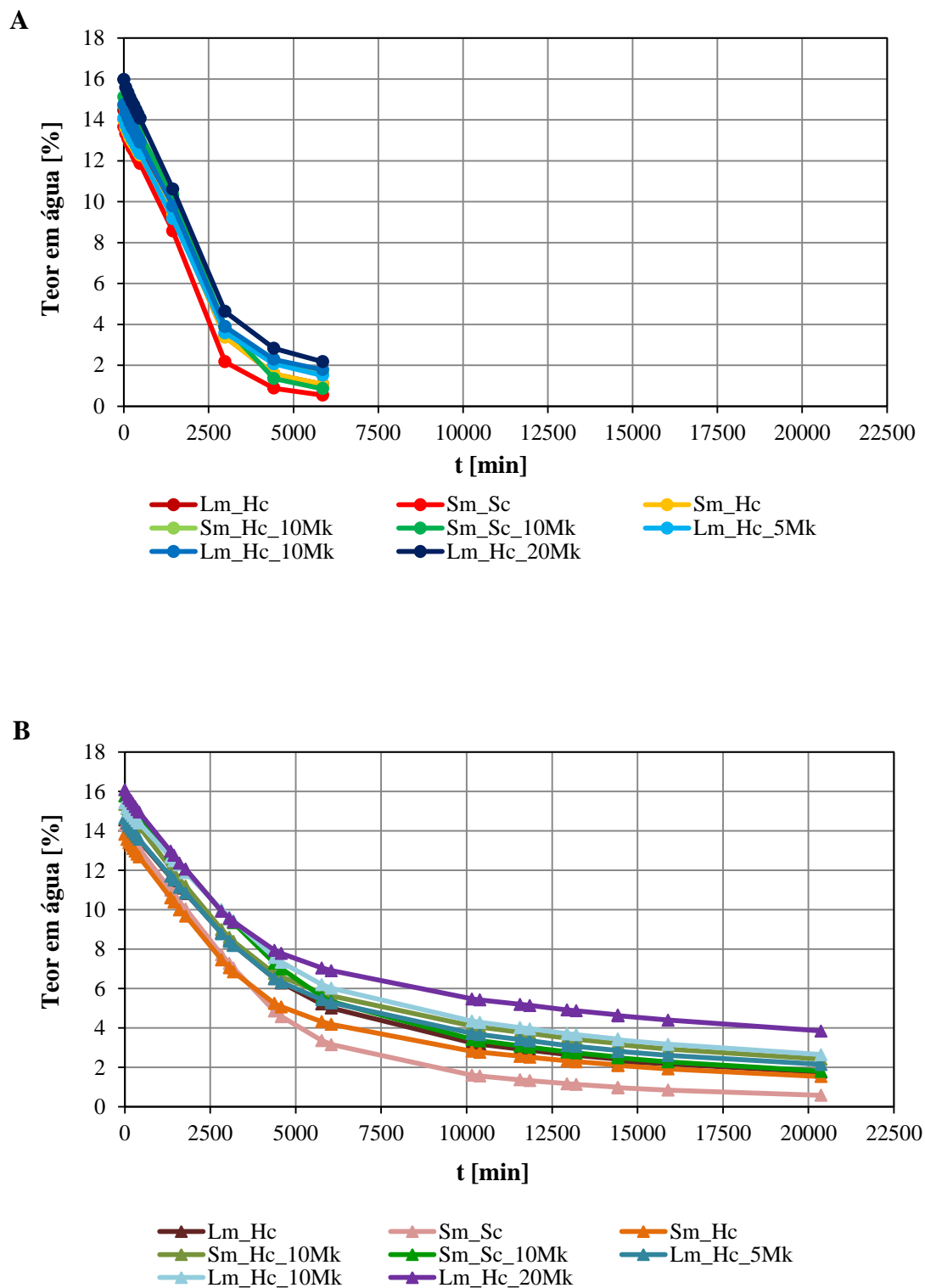


Figura 4.18 – Curvas de evaporação das argamassas
A – aos 28 dias; B – aos 90 dias

Apresentam-se nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, alguns agrupamentos de argamassas com o intuito de averiguar a possível influência do tipo cura, tempo de mistura e substituição parcial da cal por Mk, respectivamente.

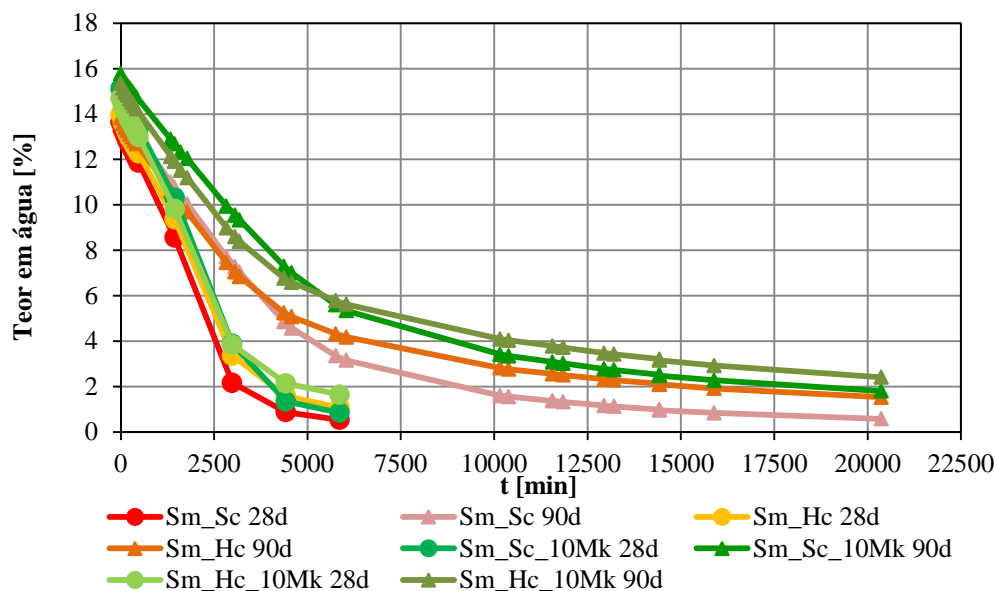


Figura 4.19 - Curvas de evaporação das argamassas com tempo de mistura standard Sm e curas standard Sc ou húmida Hc, aos 28 e 90 dias

Através da figura 4.19, constata-se no caso das argamassas sem metacaulino, uma secagem mais rápida para as de cura standard (Sm_Sc) aos 28 dias assim como aos 90. O mesmo acontece com as argamassas com a presença da pozolana, ainda que menos evidente na altura de ensaio mais jovem, onde as argamassas Sm_Sc_10Mk e Sm_Hc_10Mk apresentaram curvas de secagem muito próximas.

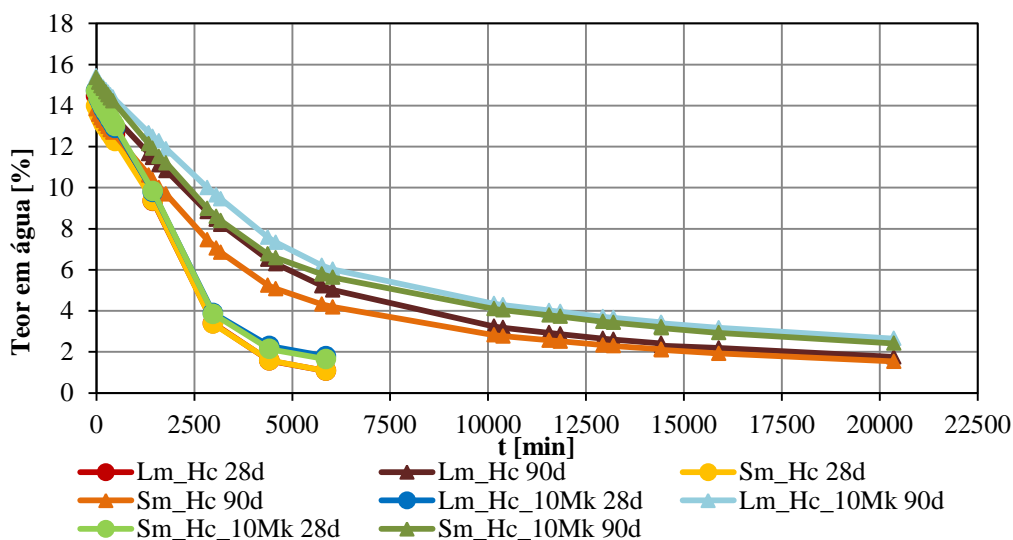


Figura 4.20 - Curvas de evaporação das argamassas de cura húmida de mistura curta Sm, ou prolongada Lm, aos 28 e 90 dias

4. Apresentação e análise de resultados

Analisando a figura 4.20, aos 28 dias, não parece existir qualquer influência do tempo de mistura, tanto nas argamassas sem metacaulino (Lm_Hc e Sm_Hc), como naquelas em que a pozolana substitui parcialmente a cal (Lm_Hc_10Mk e Sm_Hc_10Mk), sendo praticamente indistinguíveis as curvas correspondentes às diferentes argamassas.

Na altura de ensaio à idade mais avançada, embora se pareça identificar uma ligeira vantagem para as argamassas de tempo de mistura mais curto, na globalidade, as argamassas apresentam também curvas muito próximas entre elas (Lm_Hc da Sm_Hc, e Lm_Hc_10Mk da Sm_Hc_10Mk), sendo quase imperceptível a influência do tempo de mistura.

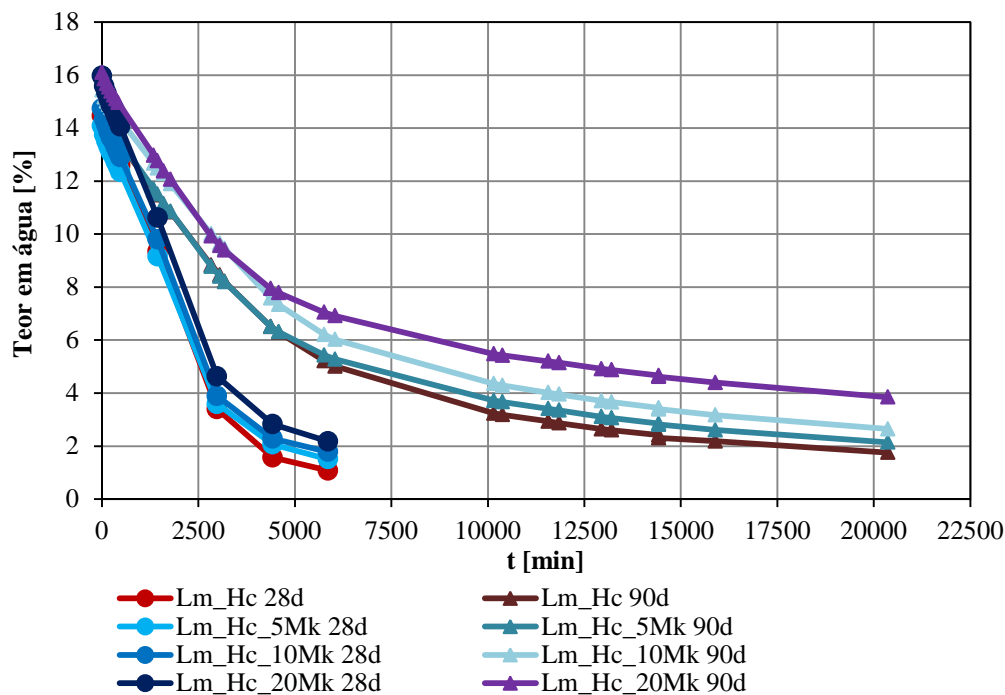


Figura 4.21 - Curvas de evaporação das argamassas de mistura longa e cura húmida Lm_Hc com diferentes teores de Mk, aos 28 e 90 dias

Pela figura 4.21, onde estão retratadas as curvas de evaporação das argamassas de tempo de mistura longo e cura húmida com diferentes teores de Mk, verifica-se que o aumento da lentidão de evaporação parece acompanhar o aumento da percentagem de Mk, especialmente no ensaio realizado aos 90 dias. Na primeira idade de ensaio (28 dias) esse comportamento não é tão evidente, uma vez que as argamassas apresentam curvas de evaporação semelhantes, sendo, ainda assim, possível detectar essa mesma tendência.

Tendo em conta a diferente preparação dos provetes entre idades, e por conseguinte os diferentes resultados, não será correcto estabelecer uma comparação em relação ao índice de secagem das argamassas entre as duas idades (tempos finais de ensaio muito diferentes). No entanto, analisando individualmente os resultados a cada idade, através da figura 4.22 (A – aos 28 dias; B – aos 90 dias)

considera-se permitir aferir uma tendência entre o comportamento das diferentes argamassas, no que diz respeito à sua facilidade de secagem.

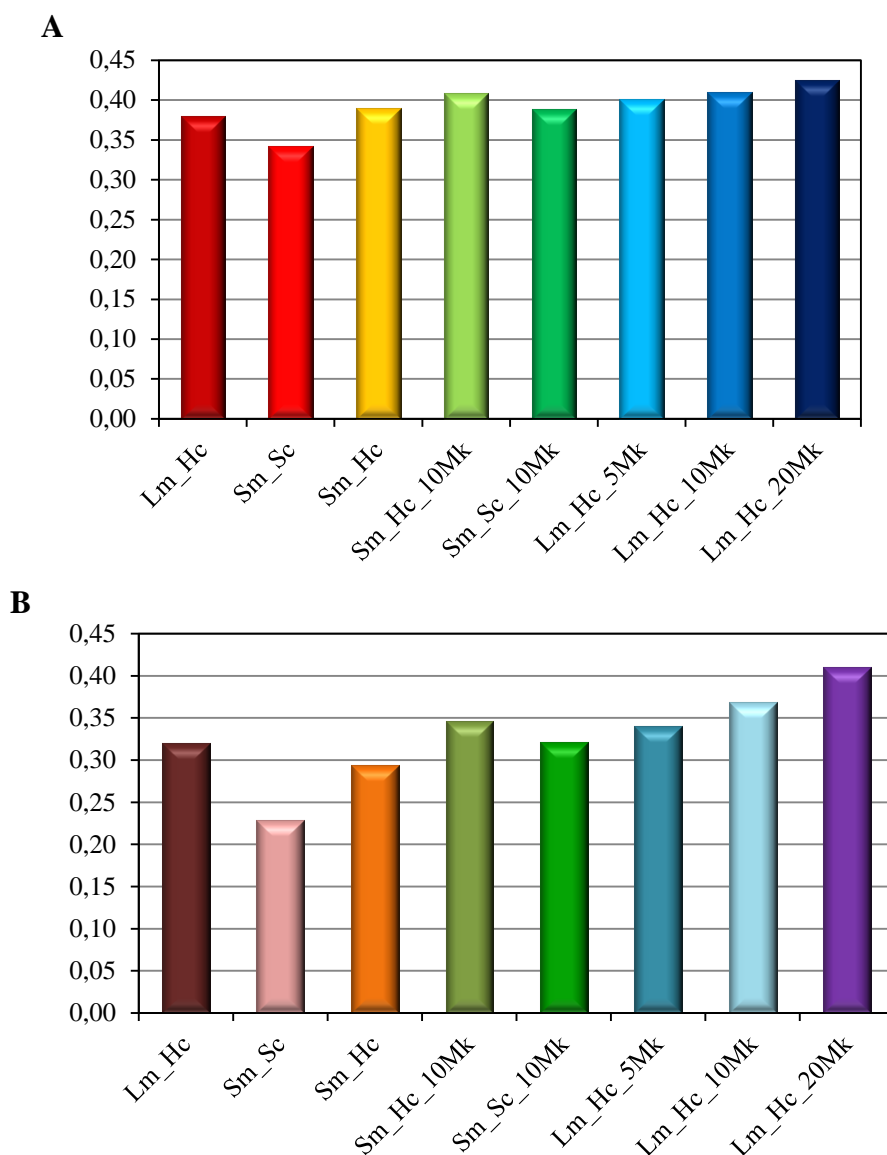


Figura 4.22 – Índice de secagem das argamassas.
A - aos 28; B – aos 90 dias

Menores índices de secagem (IS) tendem a corresponder a argamassas com maior facilidade de secagem e, pela figura 4.22, constata-se que, em ambas as idades, as argamassas sem Mk demonstraram menores índices de secagem, indiciando assim, uma maior facilidade de secagem. A argamassa Sm_Sc foi a que melhor IS (valor mais baixo) obteve e a argamassa com maior teor em metacaulino (Lm_Hc_20Mk) a que maior valor apresentou, indiciando tratar-se da argamassa com maior dificuldade de secagem. Este comportamento foi idêntico nas duas idades de cura, com um maior destaque aos 90 dias.

4. Apresentação e análise de resultados

Verifica-se que o aumento de Mk, tanto aos 28 como aos 90 dias, é acompanhado pelo aumento de IS, dando a indicação de que a pozolana dificulta a secagem das argamassas.

A influência do diferente tempo de amassadura é, mais uma vez, pouco ou nada notória, em ambas as idades, para as argamassas de cura húmida com e sem Mk, não sendo visível diferenças relevantes entre as argamassas Lm_Hc e Sm_Hc, nem entre as Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk.

A cura húmida, por sua vez, parece dificultar a secagem das argamassas, tendo-se obtido, nas duas idades de ensaio, valores de IS maiores do que nas argamassas de cura standard, especialmente, naquelas sem Mk (Sm_Sc e Sm_Hc). No caso das argamassas em que a pozolana está presente (Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk), essa diferença é visível, embora menos relevante.

4.2.4. POROSIDADE ABERTA

Como referido na descrição dos procedimentos de ensaio, a realização deste ensaio teve uma preparação diferente dos provetes entre as duas idades, tendo os provetes, aos 90 dias e ao contrário do que sucedeu aos 28 dias, sido envoltos num pedaço de collant, com o intuito de evitar pequenas perdas de massa que pudesse mascarar os resultados.

Nos quadros IX e X do Anexo II apresentam-se os resultados do ensaio e no quadro 4.2 registam-se os valores médios e desvios-padrão obtidos. Os resultados apresentados no quadro 4.2 mostram claramente uma maior porosidade aberta para todas argamassas aos 90 dias, comparativamente com a idade mais jovem. A utilização dos collants terá contribuído para este facto, exponenciando os valores obtidos, impedindo uma comparação precisa entre idades. No entanto, a tendência ocorrida a cada idade poderá ser comparada e, fazendo uma análise a cada idade separadamente, poderá se tirar as devidas conclusões, talvez com mais precisão até, aos 90 dias do que aos 28.

Nas figuras 4.23 e 4.24 são apresentados, respectivamente, os resultados de porosidade aberta (Pab) aos 28 e 90 dias.

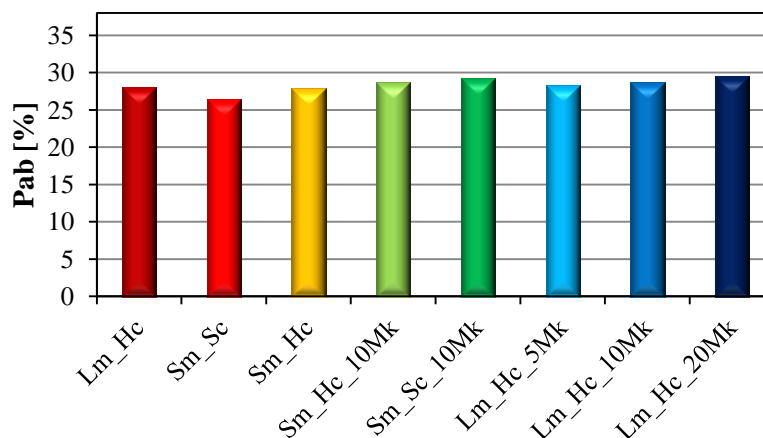


Figura 4.23 – Porosidade aberta das argamassas aos 28 dias.

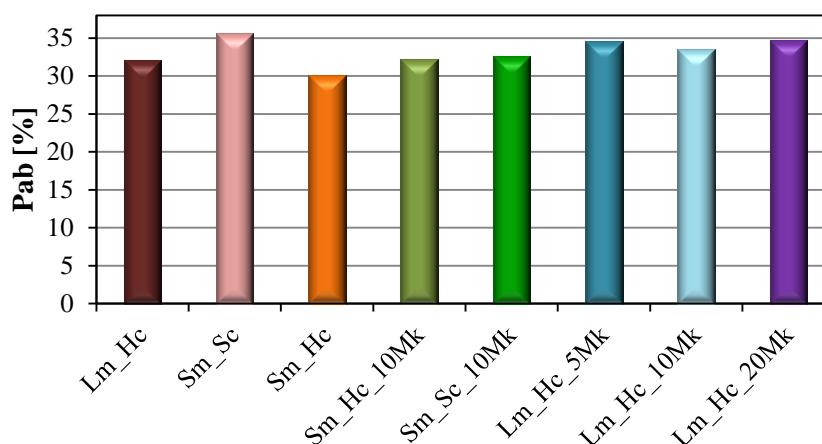


Figura 4.24 – Porosidade aberta das argamassas aos 90 dias.

Os resultados obtidos de porosidade aberta (Pab), aos 28 dias, são muito parecidos entre as argamassas, como se pode verificar na figura 4.12. A argamassa que se destaca ligeiramente para o valor mais baixo é a Sm_Sc.

Analisando as argamassas que estiveram sujeitas a diferentes curas, verifica-se que as argamassas sem Mk (Sm_Sc e Sm_Hc) demonstram um comportamento contrário ao das argamassas com Mk (Sm_Sc_10Mk e Sm_Hc_10Mk), verificando-se nestas últimas maior Pab na de cura Sc, e no caso anterior, maior Pab na argamassa de cura húmida Hc.

Não se verifica uma grande influência ao nível dos diferentes tempos de amassadura, tendo-se obtido Pab muito próximos, tanto para as Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk, como no caso das argamassas sem metacaulino (Lm_Hc e Sm_Hc).

A influência dos diferentes teores de Mk praticamente não se demonstrou, aos 28 dias de idade, nos resultados de Pab das argamassas, embora se note um ligeiro incremento de Pab acompanhando o aumento da quantidade de pozolana.

Aos 90 dias os resultados já diferem mais entre as argamassas, comparativamente com os de ensaio à idade mais jovem, constatando-se a maior Pab para a Sm_Sc e menor para a Sm_Hc. Analisando as argamassas que diferem apenas nas condições de cura a que estiveram sujeitas, verifica-se maior Pab para as de cura Sc, sem metacaulino (Sm_Sc e Sm_Hc), e sem uma alteração considerável no caso das argamassas com Mk (Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk).

O tempo de amassadura, também aos 90 dias, não se verifica ter tido grande influência, constatando-se, ainda assim, uma ligeira diferença para valores maiores de Pab nas argamassas de mistura mais prolongada Lm.

A presença de Mk, neste caso, indicia um aumento de Pab, embora pareça ser independente da percentagem de Mk substituída pela cal hidráulica. É claramente visível um aumento de Pab entre a argamassa Lm_Hc e as suas semelhantes, mas com Mk em substituição da cal, sem uma distinção relevante entre elas.

4.2.5. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

O ensaio foi realizado aos 120 dias de idade das argamassas e utilizaram-se os provetes ensaiados aos 28 dias (para determinação do módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tracção por flexão, da capilaridade e da secagem) e que permaneceram na sala de cura de referência (Sc), desde essa idade.

Os resultados de ensaio são apresentados no quadro VIII do Anexo II, e no quadro 4.2 registam-se os valores médios de condutibilidade térmica obtidos para cada argamassa e respectivo desvio-padrão. Na figura 4.25 apresentam-se os resultados obtidos, para uma melhor leitura e análise.

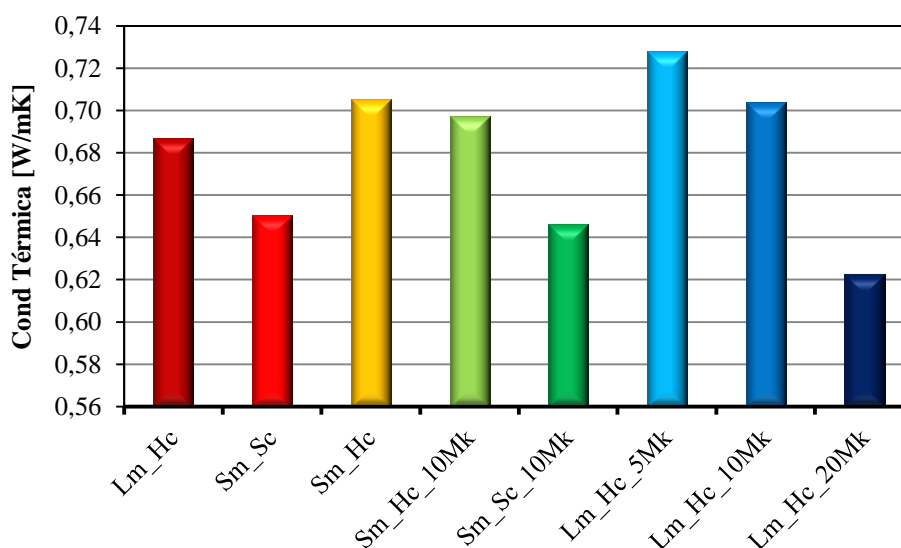


Figura 4-25 – Condutibilidade térmica das argamassas

Analisando a figura 4.25, verifica-se que os resultados obtidos variam consideravelmente entre as argamassas, destacando-se, de imediato, o menor de valor de condutibilidade térmica para a argamassa com maior teor de Mk (Lm_Hc_20Mk), e o maior valor para a argamassa com 5% de Mk (Lm_Hc_5Mk). É visível a tendência que o Mk impôs na argamassa de mistura mais prolongada e cura húmida (Lm_Hc), majorando os valores de condutibilidade térmica, com 5% de substituição da cal (Lm_Hc_5Mk) e diminuindo a partir daí à medida que aumenta a quantidade de pozolana, atingindo valores substancialmente inferiores, no caso dos 20% de substituição.

As argamassas sem a presença da pozolana apresentaram um comportamento algo variável, verificando-se entre estas um melhor comportamento (menor condutibilidade térmica) para a argamassa de mistura mais curta e cura standard (Sm_Sc). A menor condutibilidade térmica para a cura standard, está, também, bem patente nos resultados obtidos das argamassas de tempo de mistura curto, cura húmida ou standard, com 10% de Mk (Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk), verificando-se um valor muito superior para a argamassa de cura húmida.

Os diferentes tempos de mistura não demonstram uma diferença relevante, demonstrando até um comportamento contraditório. No caso das argamassas sem Mk (Lm_Hc e Sm_Hc), a de tempo de mistura mais curto obteve um resultado de condutibilidade térmica ligeiramente superior, enquanto nas argamassas com Mk (Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk) o maior valor foi obtido pela argamassa de tempo de mistura mais prolongado.

De modo a tentar estabelecer uma relação entre a condutibilidade térmica e porosidade aberta das argamassas, apresentam-se na figura 4.26 os resultados obtidos, em conjunto, dos respectivos ensaios na mesma idade de cura, ou seja, aos 28 dias.

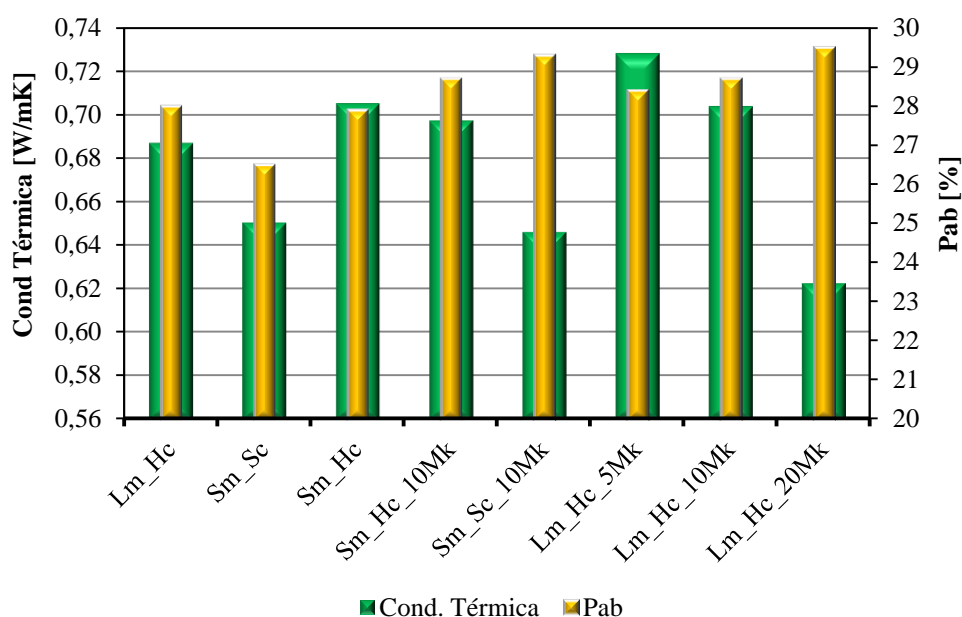


Figura 4.26 – Condutibilidade térmica e porosidade aberta das argamassas, aos 28 dias

Analisando a figura 4.26, não é clara uma relação directa entre a condutibilidade térmica e a porosidade aberta das argamassas. Se por um lado, os resultados obtidos nas argamassas de mistura longa e cura húmida com 20% de Mk (Lm_Hc_20Mk), e na de mistura curta e cura standard com 10% de Mk (Sm_Sc_10Mk), parecem querer confirmar a existência dessa correlação - menor condutibilidade térmica deverá corresponder a maior porosidade aberta (Vejmelkova et al., 2012) -, o mesmo não acontece na argamassa com o menor resultado de Pab. A argamassa com tempo de mistura curto e cura de referência (Sm_Sc) obteve um bom comportamento térmico apesar de ter sido aquela que menos porosa revelou ser.

Parece ser possível, no entanto, estabelecer uma ligação entre a influência do Mk na porosidade das argamassas e por conseguinte na sua capacidade térmica. Como já foi analisado e referido anteriormente, o aumento de Mk provocou um ligeiro aumento na porosidade das argamassas, e, consequentemente, um decréscimo nas suas condutibilidades térmicas, com maior evidência na argamassa com a maior quantidade de pozolana (Lm_Hc_20Mk). A diminuição da condutibilidade com a presença de Mk é, aparentemente, uma consequência do facto de que o Mk é um material

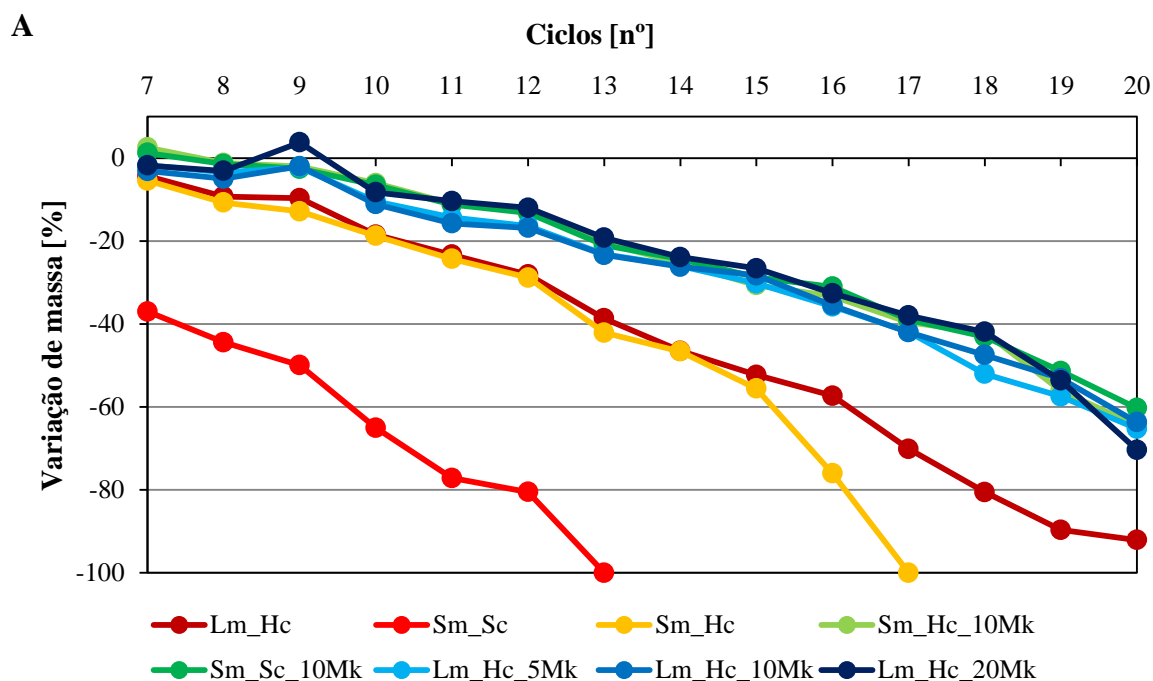
4. Apresentação e análise de resultados

poroso, e a parte dele que não participou na reacção com a cal (daí ter sido mais evidente na argamassa com maior percentagem de pozolana), contribuiu para um aumento da porosidade da matriz. Por outro lado, a porosidade do material pode também ter sido elevada devido ao carácter poroso dos produtos de reacção pozolânica (Cerny et al., 2006).

4.2.6. RESISTÊNCIA AOS SULFATOS

Como referido anteriormente, o ensaio de determinação da resistência aos sulfatos foi realizado a todas as argamassas e ocorreu aos 130 dias de idade. Os meios provetes ensaiados tinham anteriormente sido utilizados nos ensaios de capilaridade e secagem aos 28 e 90 dias, e permaneceram, desde então, na sala de cura de referência (Sc), em condições de humidade relativa de 65 ± 5 % e temperatura de 20 ± 5 °C, até à data de realização deste ensaio.

No quadro 4.2 apresentam-se as variações de massa ao fim de 20 ciclos, e na figura 4.27 ilustram-se as curvas de variação de massa - dos provetes de ensaio de 28 (A) e 90 dias (B) -, de modo a poder visualizar-se o comportamento das argamassas ao longo do ensaio, mais propriamente, entre o 7º e 20º ciclos.



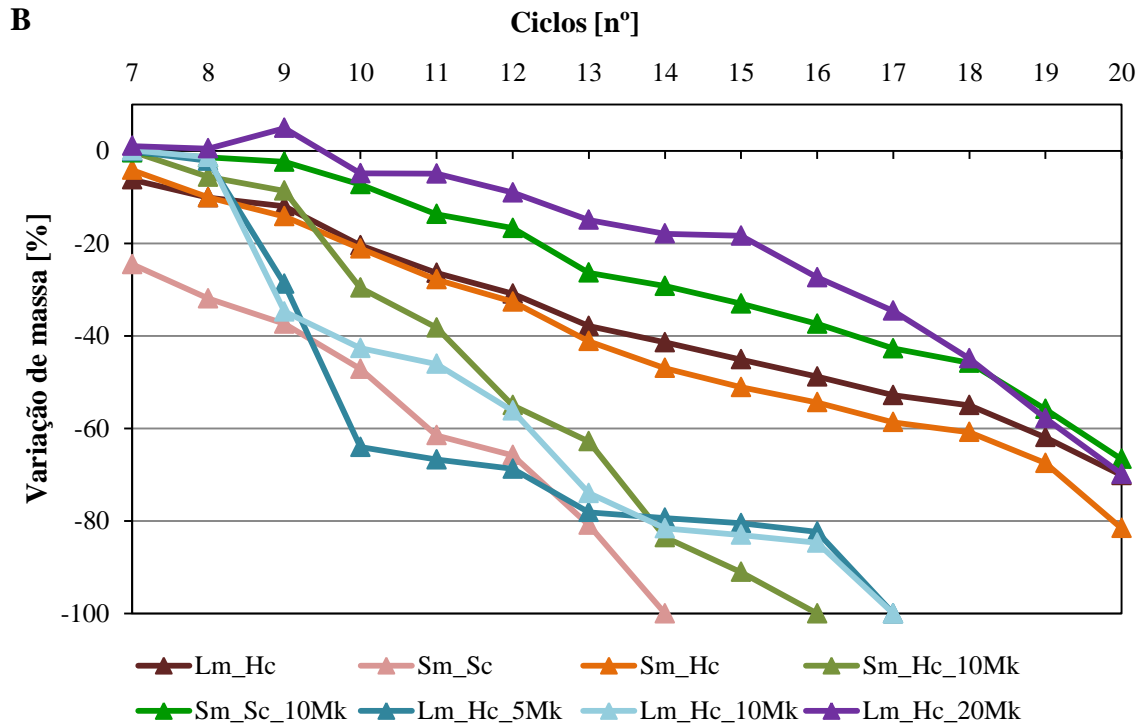


Figura 4.27 – Resistência aos sulfatos das argamassas (7º ao 20º ciclo)
 A – Provetes dos 28 dias; B – Provetes dos 90 dias.

Analisando a figura 4.27-A, é evidente o diferente comportamento entre as argamassas com e sem metacaulino. A presença da pozolana nas argamassas evidencia uma melhor resistência das mesmas a ambientes sulfurosos, verificando-se o pior comportamento para a argamassa Sm_Sc que se destruiu por completo logo ao 13º ciclo. A sua semelhante, mas de cura húmida (Sm_Hc), demonstrou um comportamento significativamente melhor, tendo em conta que só atingiu a destruição 4 ciclos depois, ou seja, ao 17º ciclo. Já a argamassa Lm_Hc apresentou um comportamento, apesar de distante daquelas com Mk, bastante favorável tendo em conta outros estudos (Faria, 2004), resistindo aos 20 ciclos de secagem/imersão em solução com sulfato de sódio. As restantes argamassas, todas elas com Mk, tiveram um comportamento ao longo dos ciclos retratados na figura 4.27-A, praticamente igual, chegando ao fim dos 20 ciclos com cerca de 70% de perda de massa, o que se considera positivo pois o ensaio simula um ataque muito agressivo de sulfatos.

Pela figura 4.27-B verifica-se um comportamento mais dispare dos provetes provenientes dos ensaios de 90 dias. Neste caso, a presença de Mk já não foi tão clara na melhoria da resistência das argamassas, constatando-se, ainda assim, que as argamassas Lm_Hc_20Mk e Sm_Sc_10Mk foram as que melhor comportamento evidenciaram, chegando ao fim do 20º ciclo com cerca de 70% de perda de massa. As argamassas Lm_Hc e Sm_Hc (idênticas, distinguindo-se, apenas, pelo período mais longo ou mais curto de amassadura, respectivamente) tiveram um comportamento semelhante, com

4. Apresentação e análise de resultados

uma ligeira vantagem para a de mistura prolongada que chegou ao 20º ciclo com menos perda de massa que a sua semelhante, com tempo de mistura mais curto.

É possível diferenciar, ainda, um outro grupo de argamassas, com uma menor resistência aos sulfatos, tendo atingido, todas elas, os 100% de perda de massa antes do último ciclo de ensaio; Sm_Sc, que, neste caso, foi também a argamassa com menor resistência a este tipo de ambientes (durou até ao 14º ciclo), Sm_Hc_10Mk, Lm_Hc_5Mk e Lm_Hc_10Mk. Entre as argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk, a primeira, de tempo de mistura mais curto, evidenciou inicialmente, um melhor comportamento, mas acabou por atingir a detioração total um ciclo antes da argamassa de mistura mais prolongada (16º e 17º ciclo, respectivamente). A argamassa Lm_Hc_5Mk, demonstrou uma perda de massa abrupta entre o 8º e 10º ciclo, vindo-se depois a verificar que, entre este grupo de argamassas com menor resistência, foi aquela, que a par da Lm_Hc_10Mk, melhor resultado obteve, tendo resistido até ao 17º ciclo de secagem/imersão em solução saturada em sulfato de sódio.

Apresentam-se na figura 4.28 os resultados da perda de massa das argamassas, diferenciando-se os provetes provenientes das duas idades de cura (28 e 90 dias), ao 13º ciclo (ciclo em que se atingiu, pela primeira vez, a destruição total de uma das argamassas).

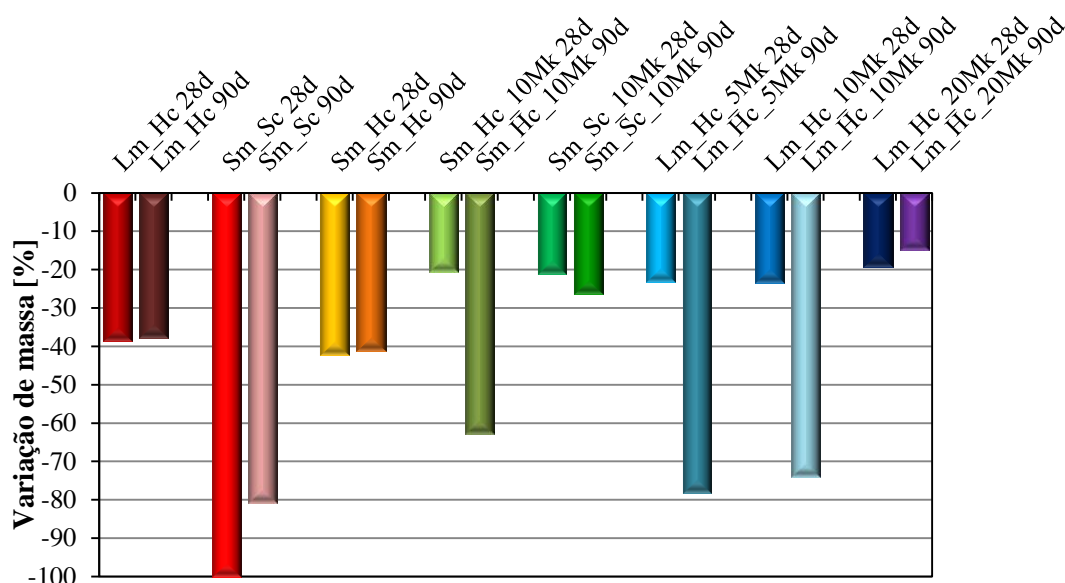


Figura 4.28 – Perda de massa das argamassas ao 13º ciclo do ensaio de resistência aos sulfatos.

Analisando a figura 4.28, tal como se tinha verificado pela figura 4.27, verifica-se um comportamento contrário nas argamassas com e sem Mk, entre os provetes dos ensaios de 28 dias e dos 90 dias. Ou seja, no caso dos provetes provenientes dos ensaios de idade mais jovem, a presença de Mk melhorou a sua resistência, enquanto com os provetes provenientes dos ensaios de 90 dias, verifica-se o contrário; de entre as argamassas com Mk, apenas nas argamassas de amassadura curta, cura standard e 10% de Mk e na de amassadura longa, cura húmida e 20% de Mk a perda de massa por ataque dos sulfatos foi reduzida. Especialmente a argamassa Lm_Hc_20Mk apresentou uma maior

resistência em relação a todas as outras, com provetes que estiveram nas curas respectivas até aos 90 dias e a partir daí e até aos 130 dias na cura standard após realização de ensaios com contacto com água (capilaridade e secagem).

Comparando as argamassas que diferem no tipo de cura a que estiveram sujeitas, é visível uma maior resistência para as de cura húmida no caso das argamassas de amassadura curta sem metacaulino (Sm_Sc e Sm_Hc), verificando-se o contrário no caso das argamassas com Mk (Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk), com provetes dos 90 dias.

Em relação aos diferentes tempos de amassadura é, mais uma vez, pouco perceptível a sua influência, tanto no caso das argamassas sem Mk (Lm_Hc e Sm_Hc), como naquelas em que a cal foi parcialmente substituída pela pozolana (Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk).

Apresentam-se comparativamente na figura 4.29 as resistências à compressão e tracção por flexão, a porosidade aberta das argamassas, assim como a correspondente variação de massa por acção dos sulfatos, ao 13º ciclo de secagem/imersão.

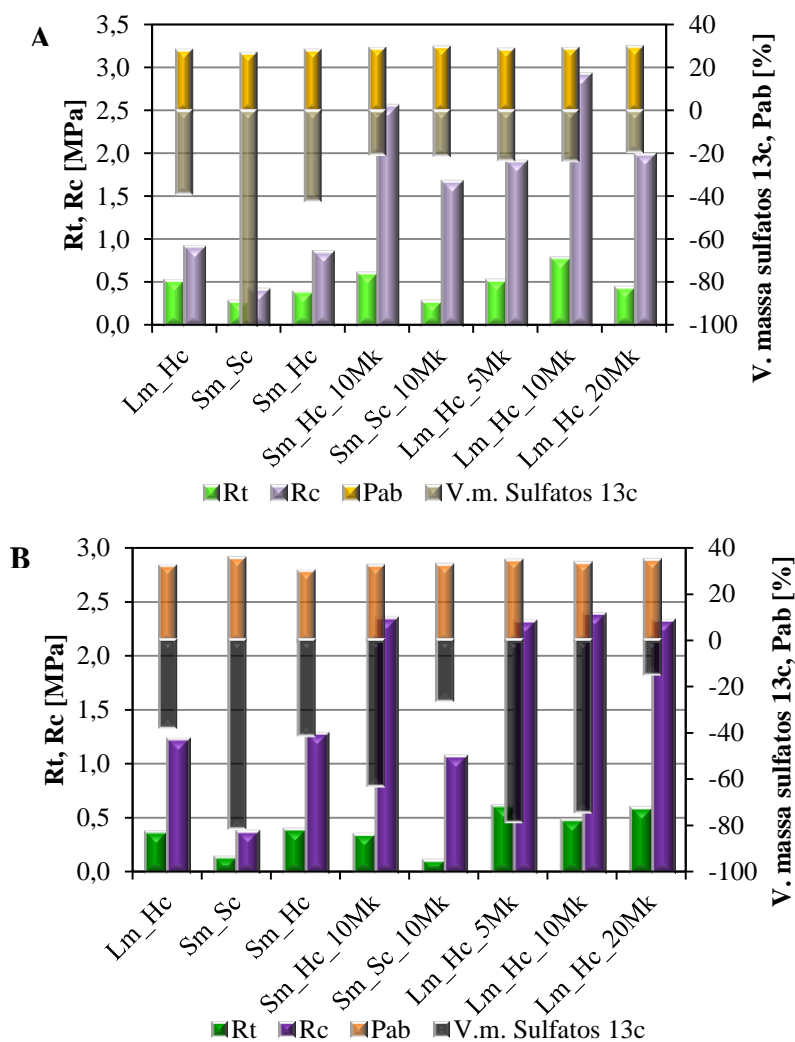


Figura 4.29 – Resistências mecânicas, porosidade aberta e variação de massa das argamassas ao 13º ciclo
A – Resultados e provetes provenientes dos ensaios de 28 dias; B – Resultados e provetes provenientes dos ensaios de 90 dias.

4. Apresentação e análise de resultados

Analisando a figura 4.29-A, referente aos resultados dos ensaios de 28 dias e dos provetes ensaiados na resistência aos sulfatos provenientes dessa data, não é fácil estabelecer uma relação entre a porosidade aberta e os restantes resultados das argamassas, uma vez que se obtiveram valores de Pab muito próximos entre todas as argamassas. No entanto, parece existir uma correlação concordante entre as resistências mecânicas e resistências a ambientes sulfurosos, na medida em que é visível que a argamassa menos resistente mecanicamente é a única que apresentou uma perda de massa total ao ciclo em análise (Sm_Sc). Por outro lado, facilmente se verifica uma melhoria da resistência à compressão a par de uma maior resistência aos sulfatos nas argamassas com substituição de Mk por cal. As diferentes percentagens de Mk parecem não alterar significativamente as resistências aos sais, mas é bem patente que a percentagem que melhor resistência à compressão oferece é de 10%, na argamassa Lm_Hc_10Mk que, não se destacando na mesma medida em relação à resistência aos sulfatos, é das argamassas que melhor desempenho teve não só ao 13º ciclo, como no desenvolvimento de todo o ensaio (fig. 4.27-A).

Pela análise da figura 4.29-B, referente aos resultados dos ensaios aos 90 dias e dos provetes provenientes dessa data, posteriormente ensaiados à resistência aos sulfatos, verifica-se que sucedeu o mesmo que anteriormente, para a argamassa Sm_Sc, que foi a que pior desempenho teve, na globalidade do ensaio de resistência aos sulfatos e também, neste caso, é aquela que pior resistência à compressão demonstrou. No entanto, algumas argamassas com Mk, como é o caso das Sm_Hc_10Mk, Lm_Hc_5Mk e Lm_Hc_10Mk, apresentaram uma elevada resistência mecânica, mas também uma grande perda de massa ao 13º ciclo. Ainda assim, as argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_20Mk obtiveram resistências mecânicas elevadas (das mais altas), assim como demonstraram um bom resultado face à presença de sulfatos, tendo sido as que melhor resistiram a este ambiente na totalidade do ensaio. Os elevados resultados de Pab obtidos por estas argamassas poderão explicar esta diferença entre as argamassas com Mk, uma vez que, a argamassas com maior porosidade poderão corresponder poros de maiores dimensões, que facilitem a cristalização dos sais sem exceder o volume do poro e sem causar danos na estrutura de argamassa envolvente (Faria, 2004).

4.2.7. ENSAIOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS

Estes ensaios, que englobaram análises mineralógicas por difracção de raios X (DRX) e térmicas por termogravimetria e térmica diferencial (TG-ATD), foram realizados no LNEC às argamassas com 28 e 90 dias de idade.

A DRX é uma técnica de análise mineralógica que, como o seu nome indica, apenas permite a identificação dos compostos cristalinos presentes nas argamassas. Em argamassas hidráulicas formam-se também compostos amorfos, que não são detectados por DRX. Nestes casos é muito comum a utilização da TG-ATD para complementação dos resultados da DRX.

As análises DRX e TG-DTA foram efectuadas com o objectivo de complementar os resultados da análise física e mecânica, tendo como principal preocupação verificar as modificações da composição mineralógica das argamassas, e a existirem se essas tiveram repercussão naquelas características. Assim, esta análise vai ser efectuada de forma a dar contributos para responder à influência de 3 parâmetros principais em estudo nas argamassas realizadas:

- 1) Alteração do tempo de amassadura;
- 2) Influência do tipo de cura, húmida versus standard;
- 3) Influência da utilização do metacaulino.

No Anexo III apresentam-se as análises DRX e dTG que não se consideraram necessárias apresentar no presente capítulo, por não contribuírem directamente para a análise dos 3 parâmetros em estudo.

1) Alteração do tempo de amassadura:

Para avaliar o efeito do tempo de mistura nas características mineralógicas, apresentam-se nas figuras 4.30 a 4.37 as curvas DRX e dTG das argamassas fabricadas para o estudo desse efeito.

Relativamente às argamassas de cura húmida, sem presença da pozolana (Sm_Hc e Lm_Hc), na figura 4.30, para além de uma maior proporção de feldspato (areia) na amostra de tempo de amassadura longo (Lm_Hc) aos 28 dias, constata-se que ambas as amostras apresentam composição mineralógica similar. Este resultado está de acordo com os resultados da análise termogravimétrica (fig. 4.31), que mostram curvas dTG também muito semelhantes.

4. Apresentação e análise de resultados

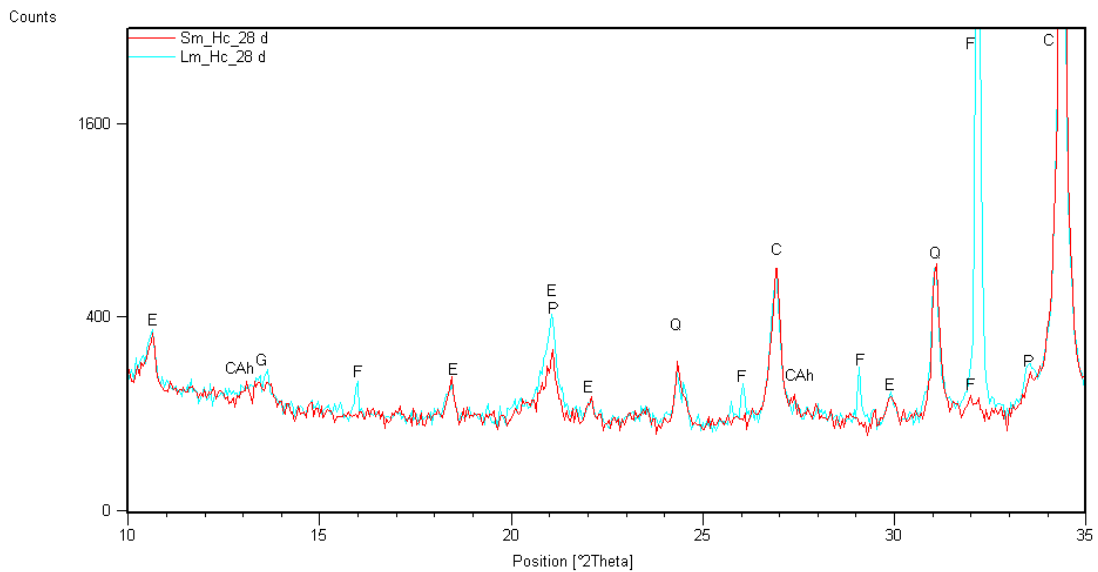


Figura 4.30 – DRX das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 28 dias de idade

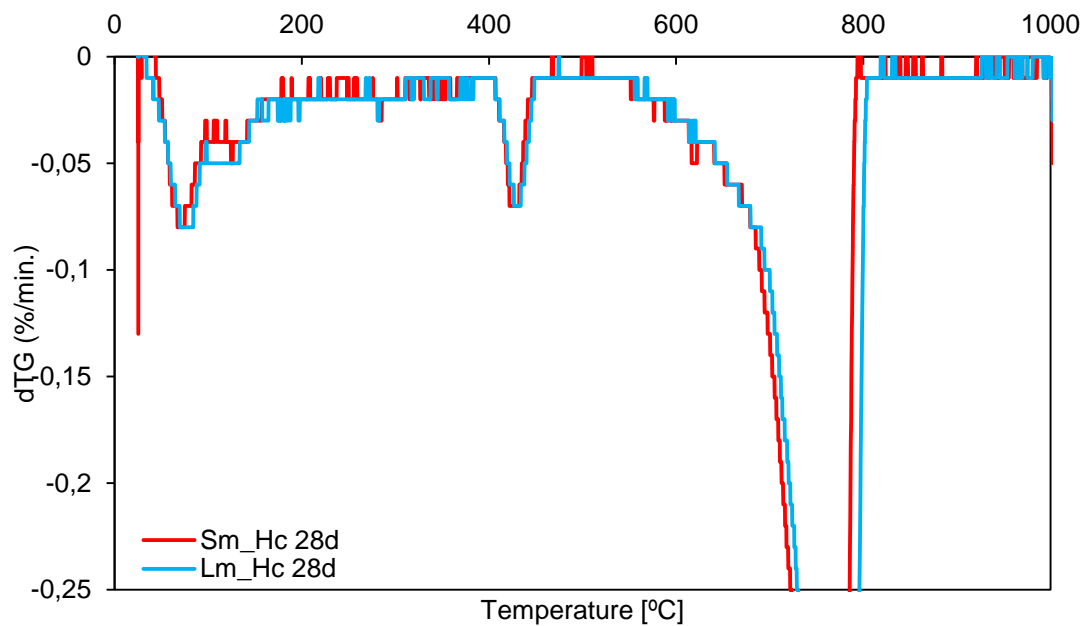


Figura 4.31 - dTG das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 28 dias de idade.

De acordo com os resultados não se verifica ter existido influência do tempo de mistura no tipo de compostos formados nestas argamassas. Esta afirmação parece ser justificada pelos resultados obtidos para as mesmas argamassas aos 90 dias de cura (figs. 4.32 e 4.33).

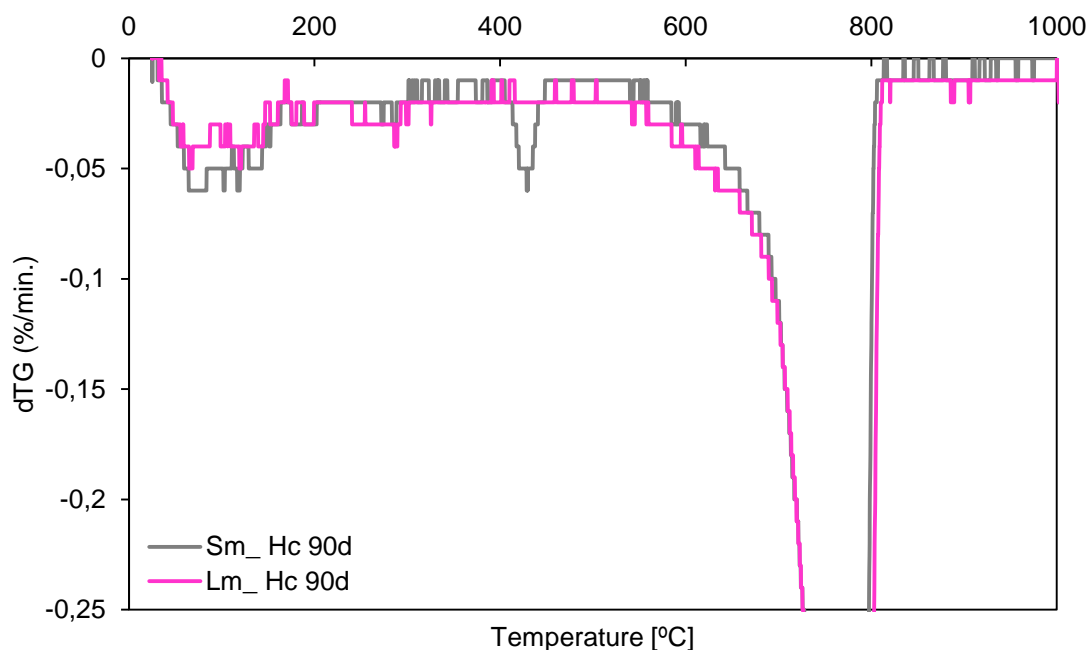


Figura 4.32 - DRX das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 90 dias de idade.

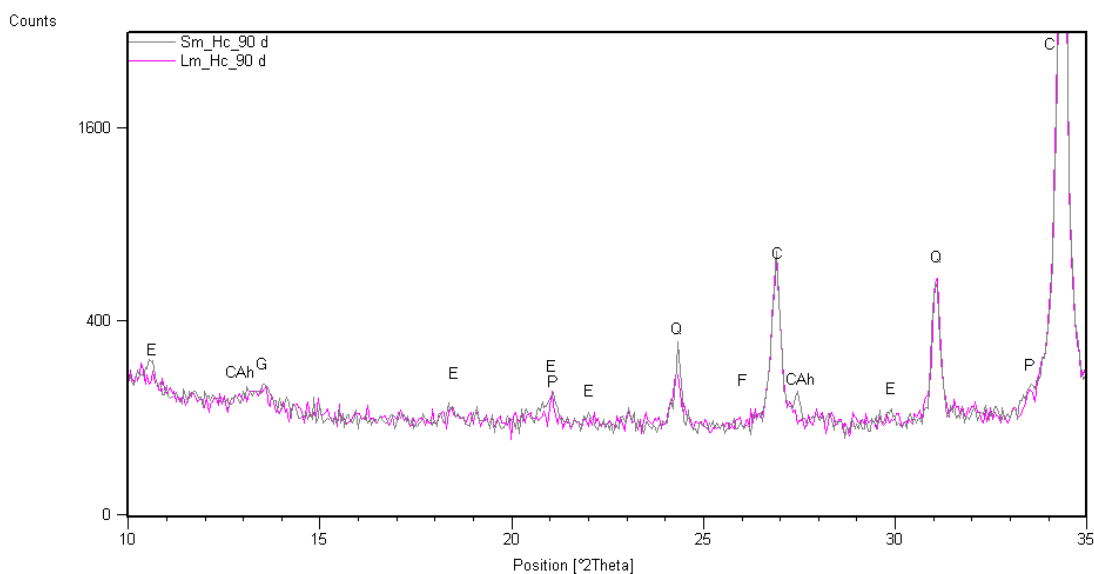


Figura 4.33 - dTG das argamassas Sm_Hc e Lm_Hc aos 90 dias de idade

Em relação às argamassas de cura húmida com 10% de Mk (Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk), observando as figuras 4.34 a 4.37, mantém-se a mesma tendência verificada nas argamassas sem pozolana. No entanto, existe uma diferença assinalável aos 28 dias de cura, onde se verifica nas curvas dTG, para a argamassa de mistura mais prolongada, uma maior perda de massa na ordem dos 150°C, indiciando uma maior reacção pozolânica (figs. 4.34 e 4.35). Este facto explica a maior resistência

4. Apresentação e análise de resultados

mecânica obtida nesta argamassa (Lm_Hc_10Mk), a esta idade, em comparação com a de tempo de amassadura mais curto (fig. 4.10).

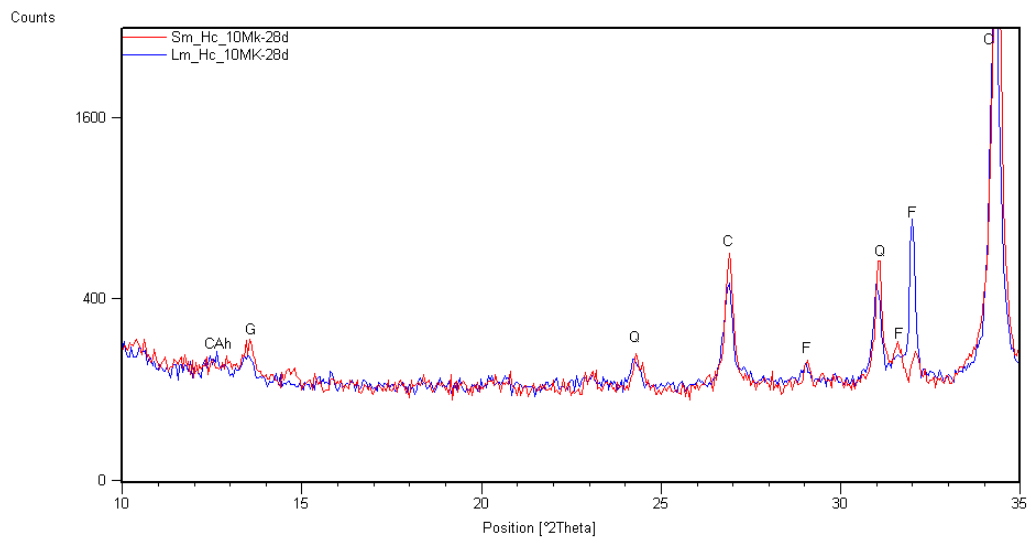


Figura 4.34 – DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 28 dias de idade.

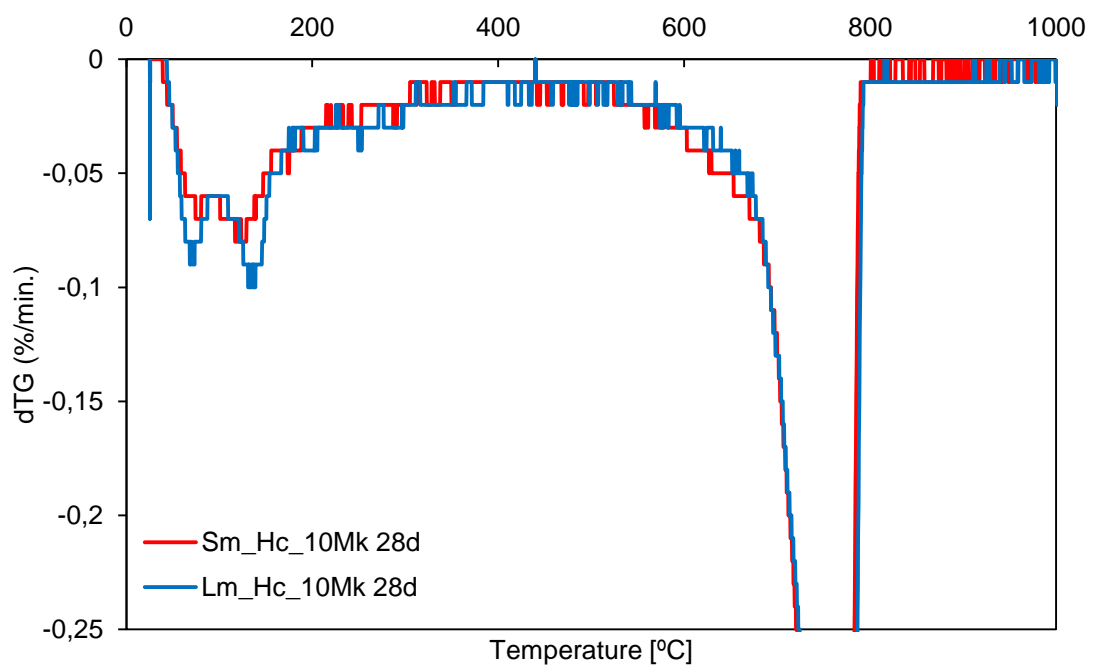


Figura 4.35 - dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 28 dias de idade.

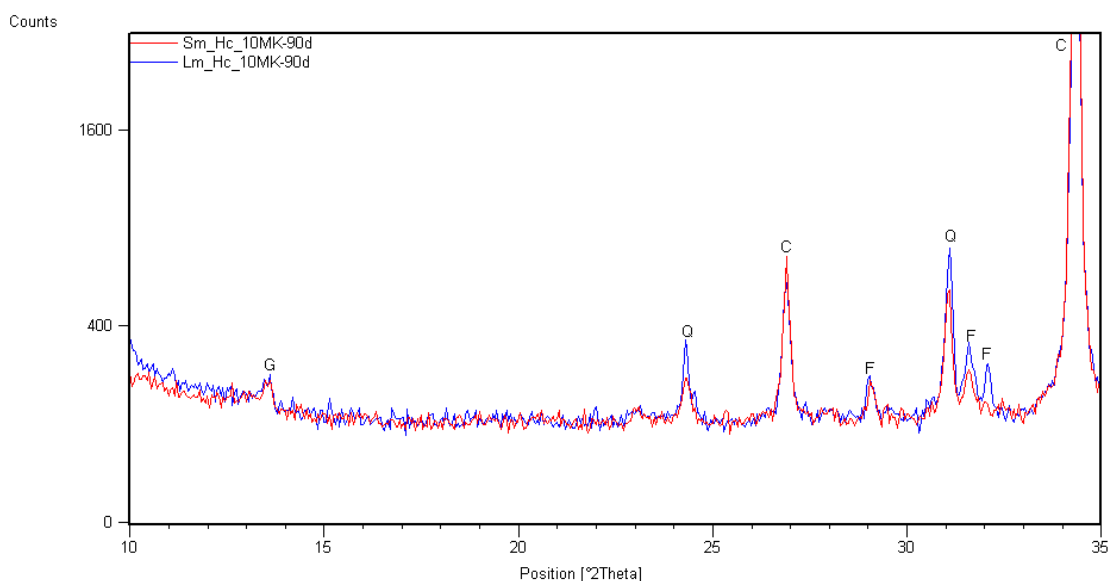


Figura 4.36 - DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 90 dias de idade.

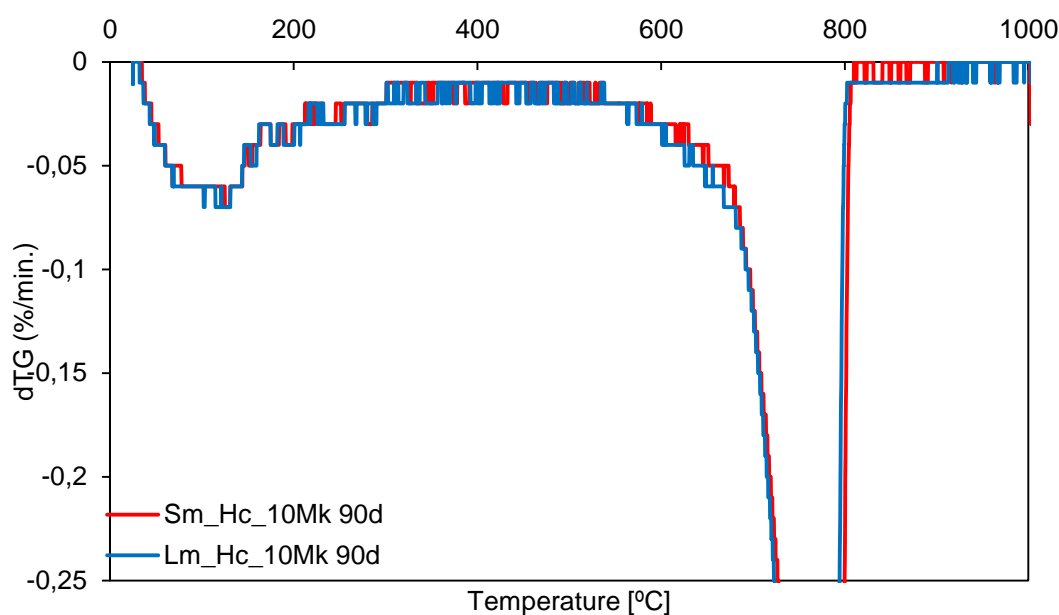


Figura 4.37 - dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Lm_Hc_10Mk aos 90 dias de idade.

2) Influência do tipo de cura, húmida versus standard:

Nas figuras 4.38 a 4.45, avalia-se o efeito das diferentes condições de cura, nomeadamente em termos de humidade relativa.

A argamassa Sm, em ambas as idades, apresenta Portlandite (P) livre na cura húmida (pico na ordem dos 400°C, nas fig. 4.39 e 4.41), enquanto na cura standard já não se detecta. Este facto aponta para que as condições de cura húmida são mais desfavoráveis à carbonatação (como seria de esperar)

4. Apresentação e análise de resultados

que as de cura standard. Aliás, verifica-se na amostra Sm_Hc, além de Portlandite, a presença de Etringite (pico na ordem dos 100°C, nas fig. 4.39 e 4.41) em maior quantidade que na amostra da mesma argamassa que esteve em cura standard (Sm_Sc). A Etringite (E), que é um mineral de hidratação dos ligantes hidráulicos e que possui na sua composição até 32H₂O, corrobora a anterior afirmação, que aponta para que a cura em ambiente húmido favoreça mais a reacção hidráulica. Esta análise permite justificar os resultados mecânicos obtidos para estas argamassas, tendo-se verificado valores substancialmente superiores para as argamassas de cura húmida (fig. 4.9).

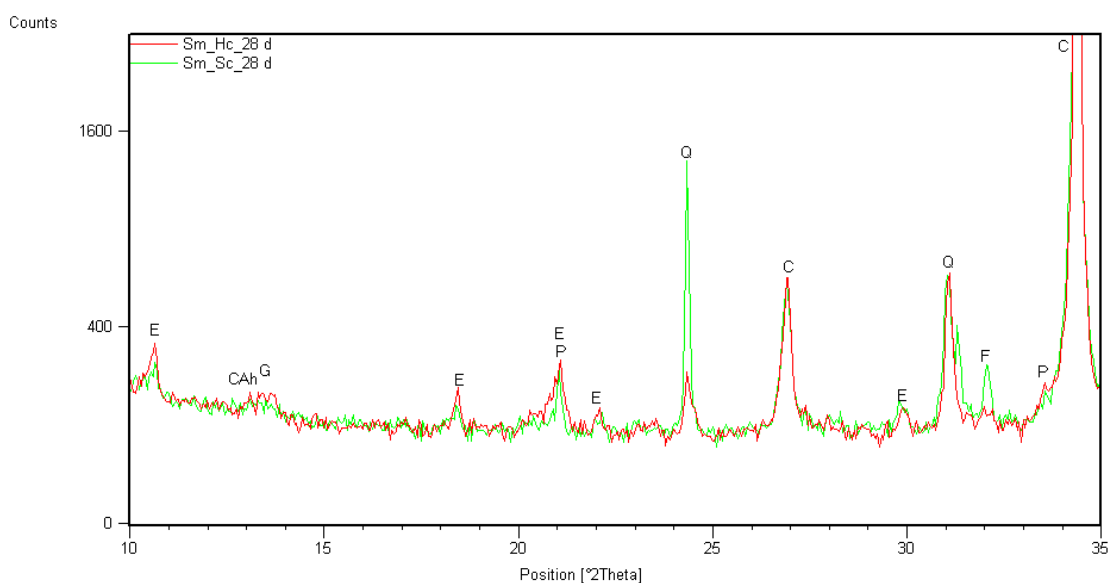


Figura 4.38 – DRX das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 28 dias de idade.

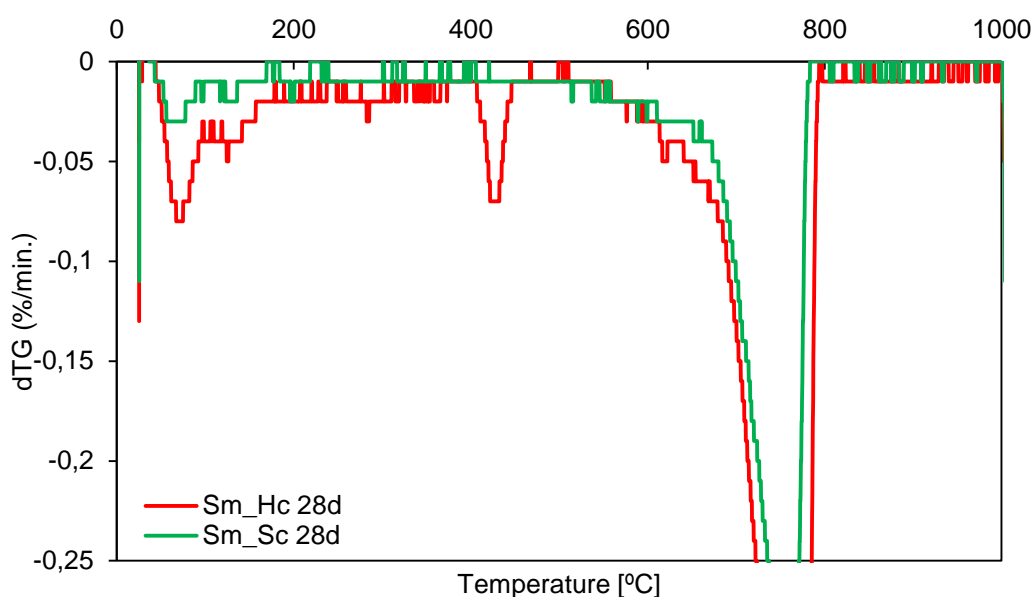


Figura 4.39 – dTG das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 28 dias de idade.

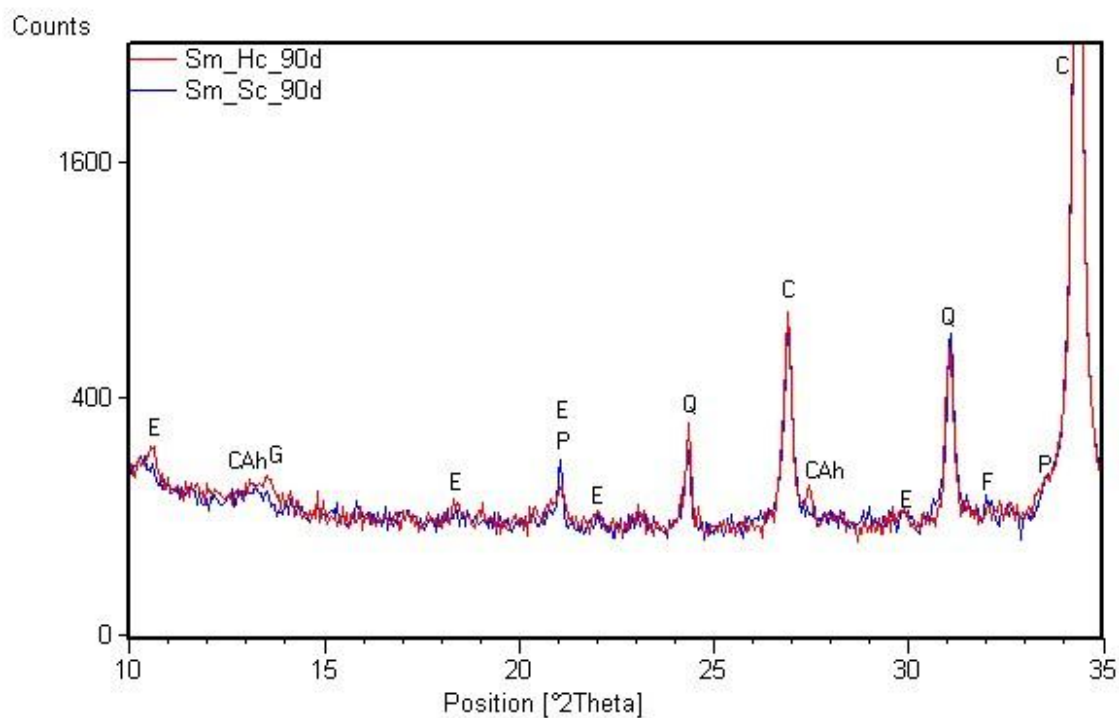


Figura 4.40 - DRX das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 90 dias de idade.

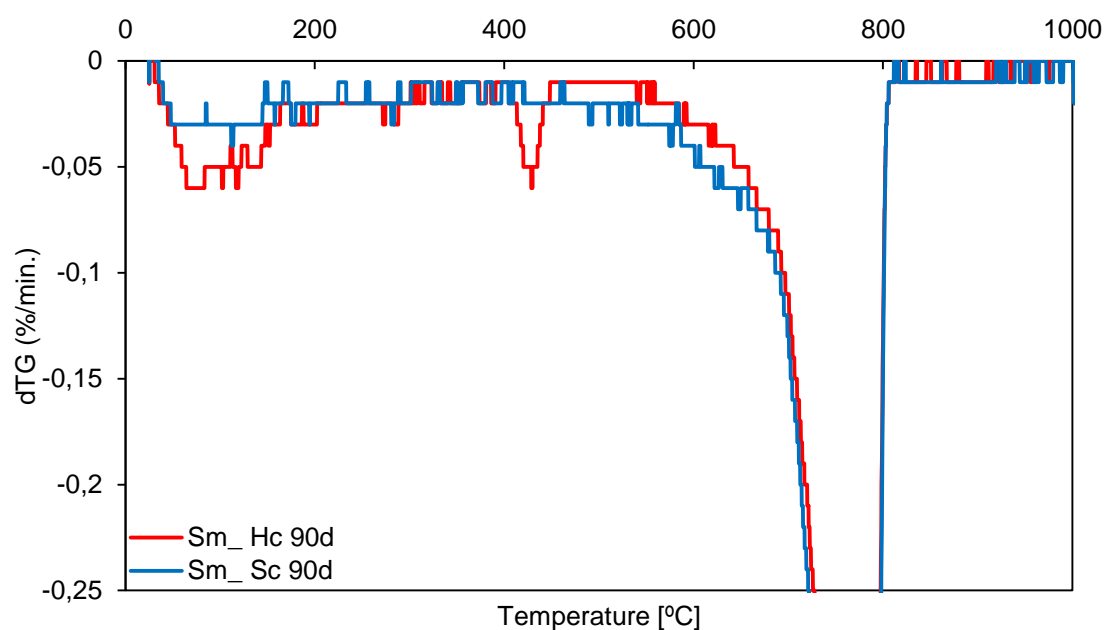


Figura 4.41 - dTG das argamassas Sm_Hc e Sm_Sc aos 90 dias de idade.

Em termos do efeito das condições de cura na composição com 10% de metacaulino, não se verificam diferenças assinaláveis no tipo de compostos formados, quer aos 28 dias (fig. 4.42 e 4.43), como aos 90 dias (fig. 4.44 e 4.45).

4. Apresentação e análise de resultados

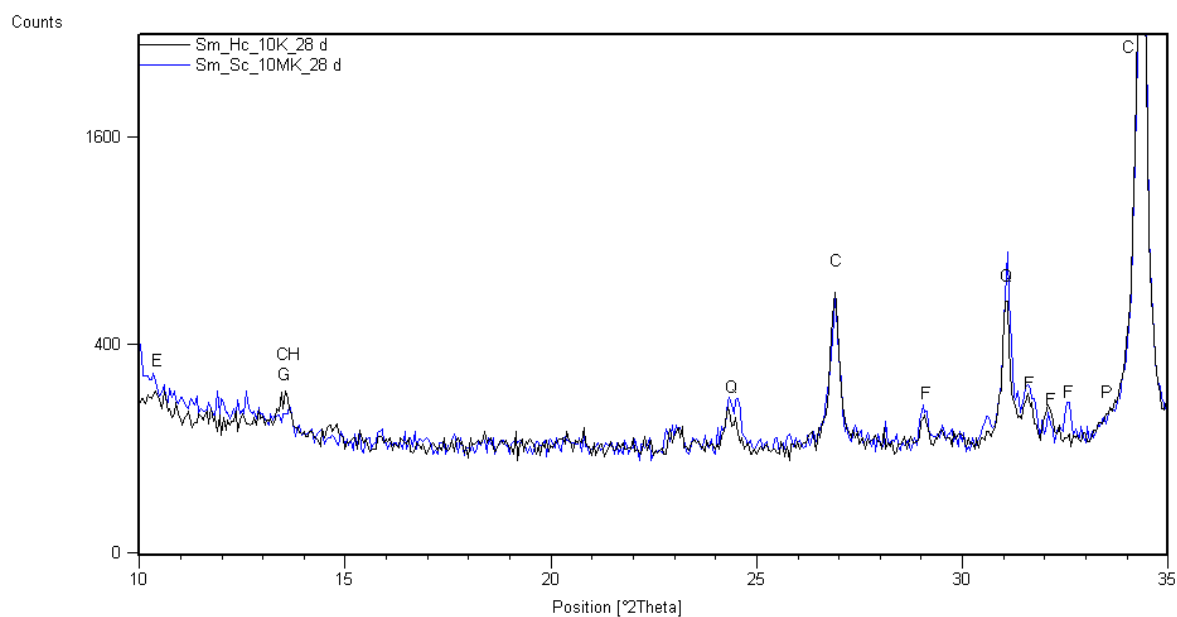


Figura 4.42 – DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 28 dias de idade.

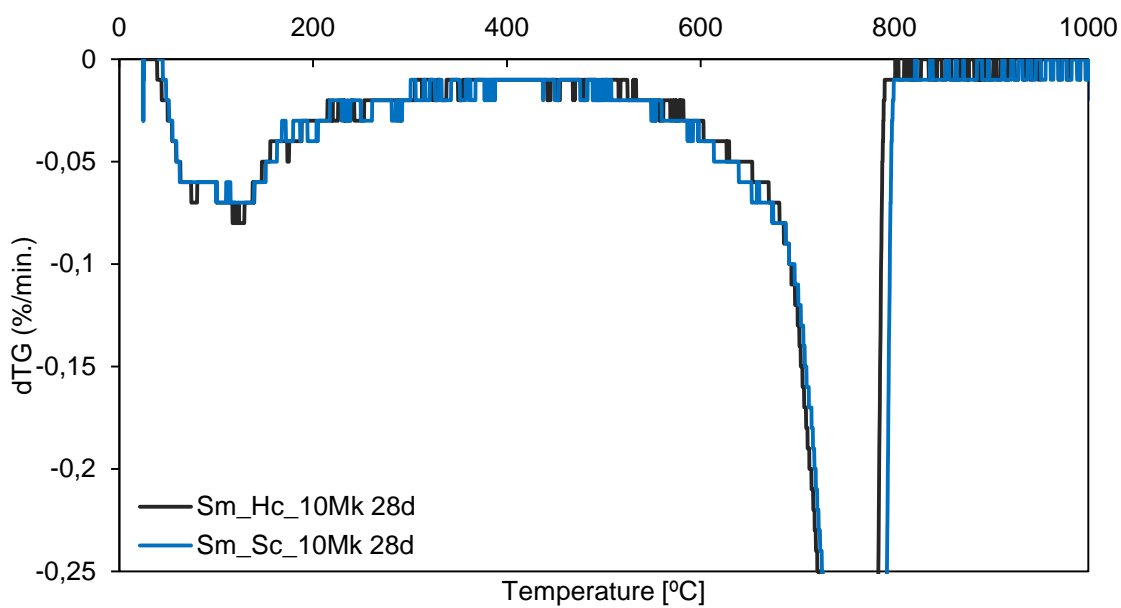


Figura 4.43 – dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 28 dias de idade.

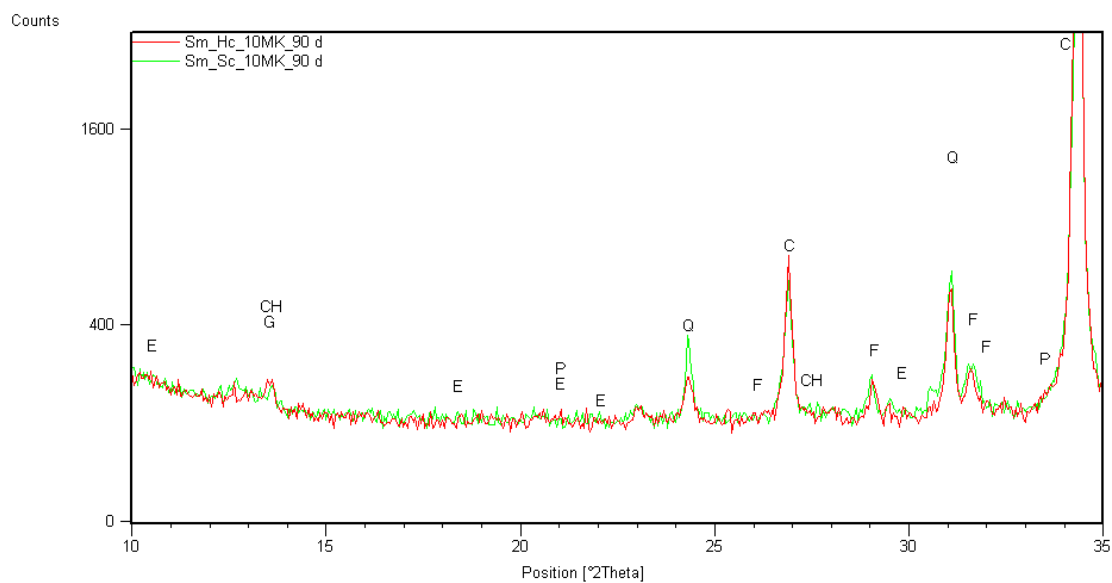


Figura 4.44 - DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 90 dias de idade.

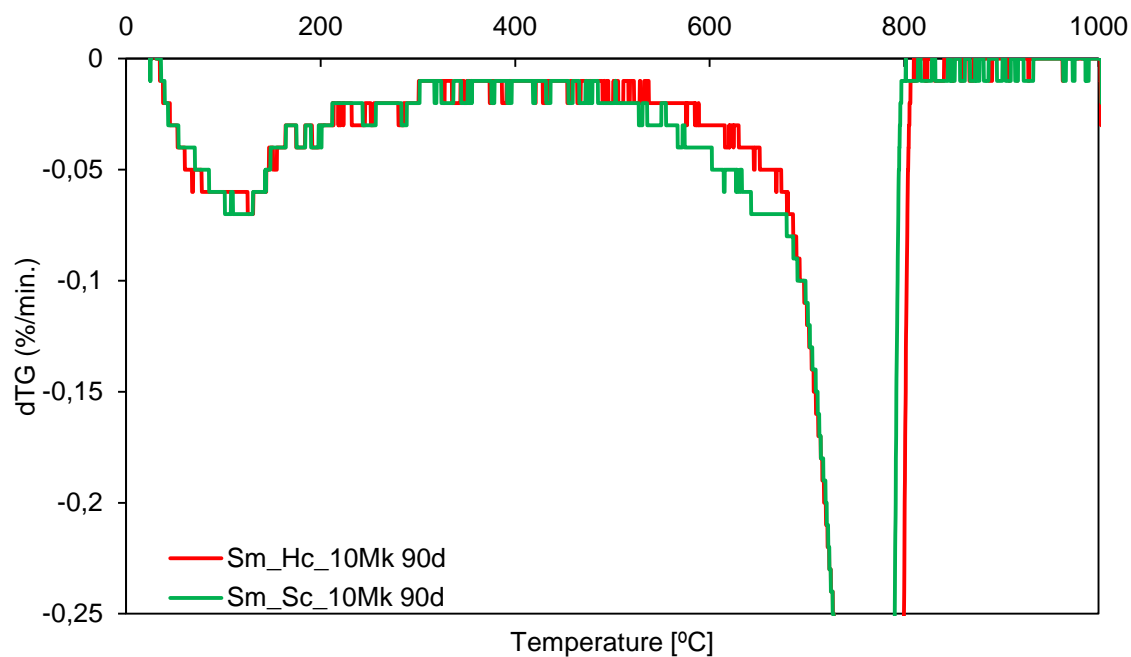


Figura 4.45 - dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk e Sm_Sc_10Mk aos 90 dias de idade.

4. Apresentação e análise de resultados

3) Influência da utilização do metacaulino:

Para avaliar o efeito da introdução de metacaulino nas características mineralógicas das argamassas de mistura longa e cura húmida, apresentam-se nas figuras 4.46 a 4.49, as curvas DRX e dTG das argamassas fabricadas para o estudo desse efeito.

Analisando as argamassas na idade mais jovem (fig. 4.46 e 4.47), verifica-se que o aumento da pozolana em substituição da cal trás um benefício crescente até aos 10% em massa, estabilizando a partir dessa proporção. Com a introdução das argamassas com Mk, verifica-se na DRX (fig.4.46), em paralelo com o aumento do teor da pozolana, uma diminuição da Etringite (E), devido ao efeito de diluição da cal provocado pela adição de Mk, e uma diminuição da Portlandite (P), que por não ser acompanhada por um aumento da carbonatação (Calcite não aumenta), significa que houve reacção pozolânica entre a cal e Mk. Esta afirmação é suportada pela presença de um aluminato de cálcio hidratado (CH), mais evidente na argamassa com 5% de Mk, e com menos intensidade na argamassa com 10% Mk, indiciando tratarem-se de compostos instáveis. Com a introdução da argamassa com 20% de Mk, não se verificam diferenças na composição entre as argamassas Lm_Hc_10Mk e Lm_Hc_20Mk, o que aliado ao facto de praticamente já não existir Portlandite na argamassa com 10% de Mk, indica que a mesma foi totalmente consumida pela argamassa dessa composição. Assim, tendo presente uma menor quantidade de Portlandite, disponível para reagir com o Mk, era espectável uma menor formação de compostos pozolânicos e, conseqüentemente, menores resistências mecânicas entre estas argamassas.

A análise termogravimétrica sustenta a DRX, verificando-se na figura 4.47, uma perda de massa na ordem dos 400°C, referente à Portlanite, que deixa de existir nas argamassas com Mk, e a perda de massa pelos 150/200°C, que indicia reacções pozolânicas, é crescente com o aumento de Mk, até aos 10% de substituição em massa. As curvas dTG das argamassas Lm_Hc_20Mk e Lm_Hc_10Mk são muito idênticas corroborando a análise por difracção de raios X.

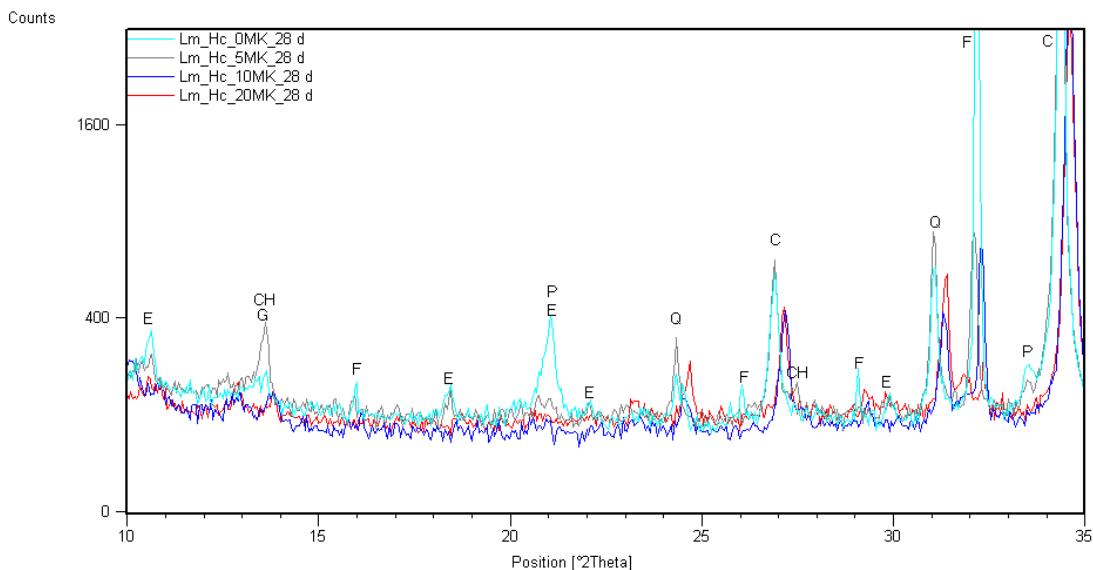


Figura 4.46 – DRX das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 28 dias de idade.

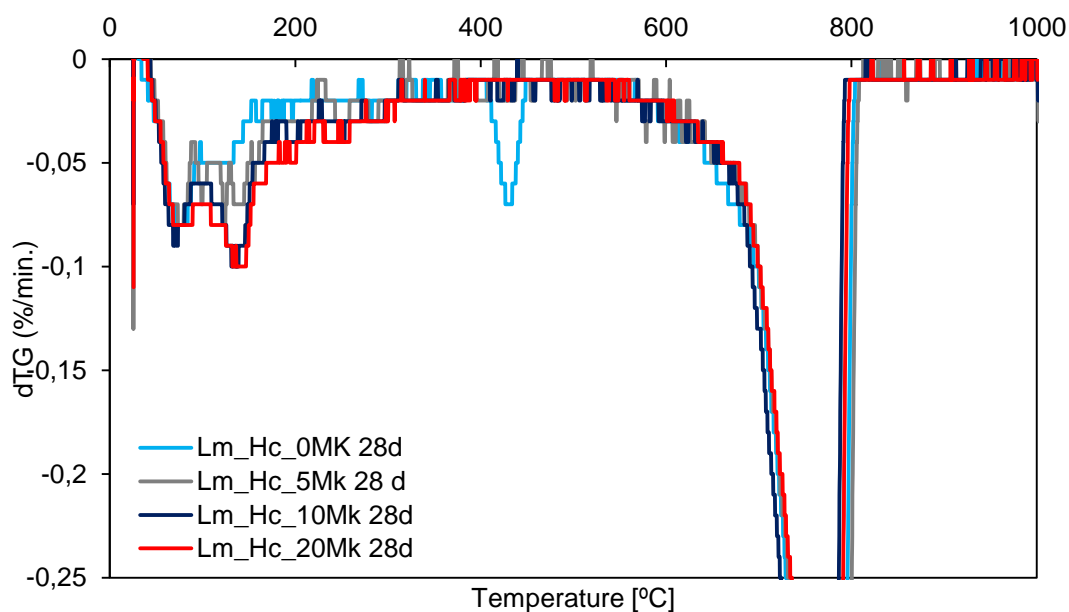


Figura 4.47 – dTG das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 28 dias de idade.

Ao longo do tempo, analisando as figuras 4.48 e 4.49 referentes aos 90 dias de idade das argamassas, parece perder-se o efeito do metacaulino. Porém, constata-se que a argamassa com 5% de Mk apresenta um aluminato de cálcio CH (com $11\text{H}_2\text{O}$), que se atribui à reacção pozolânica (fig. 4.48), indo de encontro com o verificado na figura 4.49, da curva dTG, pela perda de massa entre os 150°C e 200°C . Com o aumento da pozolana em substituição da cal, verifica-se a diminuição ao longo do tempo na proporção desses aluminatos de cálcio, o que revela, uma vez mais, que se tratam de

4. Apresentação e análise de resultados

compostos instáveis. Por outro lado, não se vê qualquer evolução em termos de Calcite (carbonatação), devendo-se, em parte, à instabilidade dos compostos pozolânicos formados, assim como ao factor de diluição da cal, que origina menor formação de Calcite (C).

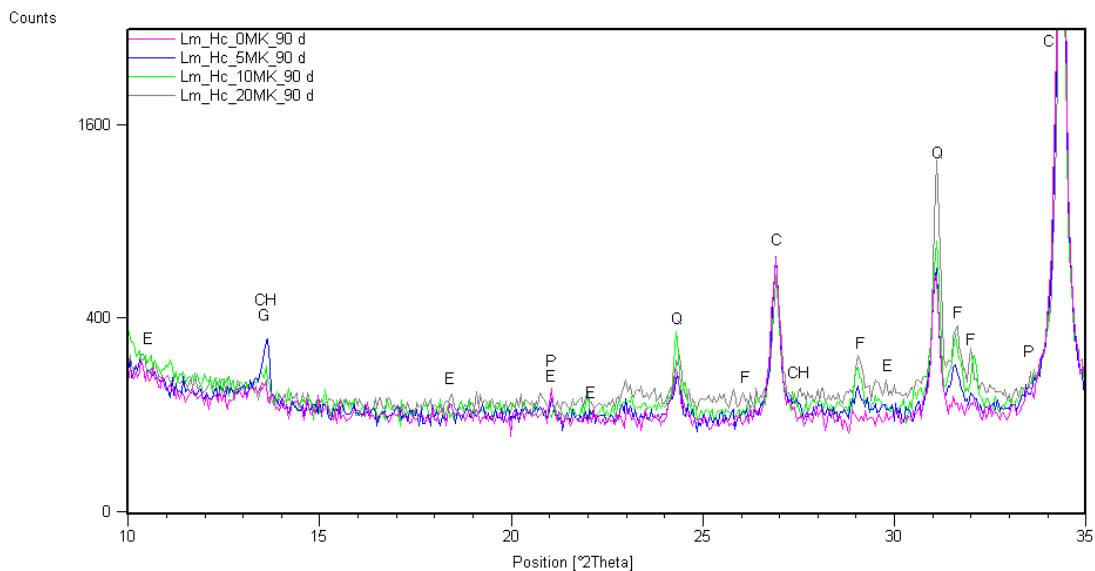


Figura 4.48 - DRX das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 90 dias de idade.

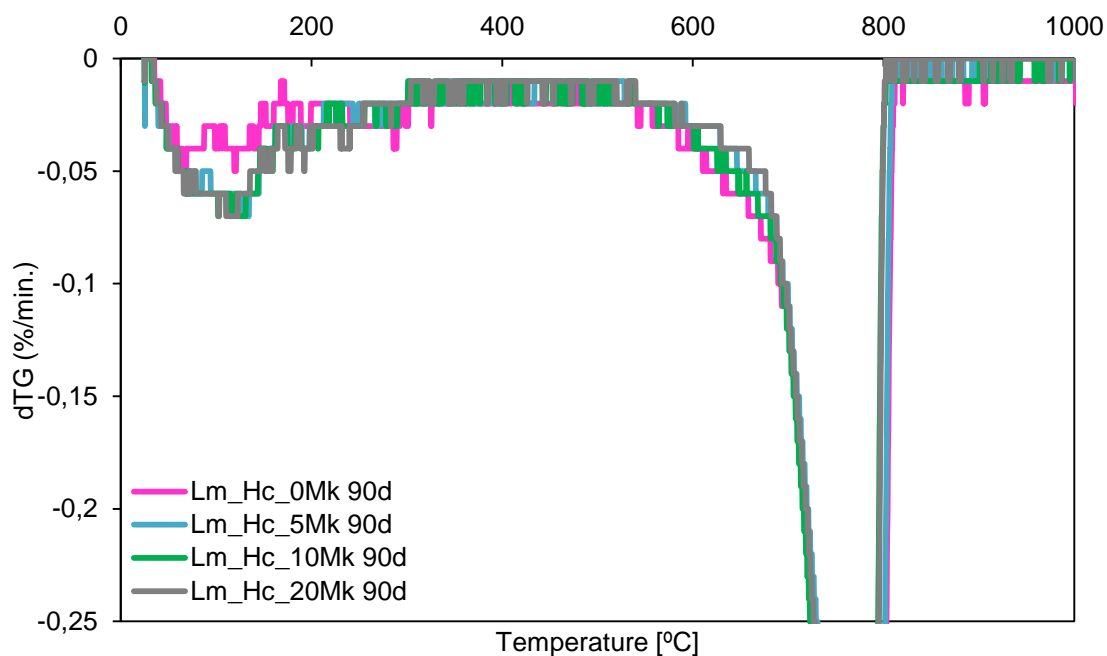


Figura 4.49 - dTG das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10/20Mk aos 90 dias de idade.

A análise química e mineralógica destas argamassas justifica os resultados das suas resistências mecânicas. Verificou-se nas duas idades de ensaio, que as argamassas com 5% e 10% de Mk são mais resistentes que a sua semelhante, sem a substituição de cal pela pozolana, tendo-se obtido valores inferiores para o caso da argamassa com 20% de Mk, ainda assim superiores aos da argamassa só de cal.

Entre os 28 e 90 dias foi também visível uma diminuição das resistências mecânicas, tendo todas as argamassas com Mk atingido valores semelhantes, mas superiores aos da argamassa sem a pozolana.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES FINAIS

As argamassas de cimento apesar de rapidamente adquirem elevadas resistências mecânicas, e apresentarem um baixo coeficiente de absorção capilar, são caracterizadas por resistências mecânicas geralmente demasiado elevadas face aos suportes onde são aplicadas, baixa deformabilidade, dificuldade de secagem, baixa permeabilidade ao vapor de água e libertação de sais solúveis, que lhes conferem pouca compatibilidade e com custos danosos para os suportes. Por outro lado requerem elevados consumos energéticos e de recursos naturais inerentes à produção do cimento, incluindo a moagem do clínquer (Faria et al., 2012a).

A cal hidráulica natural, produzida a partir de calcários com alguma percentagem de argilas, a temperaturas substancialmente inferiores às utilizadas na produção do cimento, pode conferir às argamassas características mecânicas mais adequadas à sua aplicação na reabilitação de edifícios, e, aliado ao facto de existir em Portugal matéria-prima adequada à sua produção, constituem uma excelente opção na utilização em argamassas de substituição. Ao abrigo da nova versão da norma (IPQ, 2011) houve necessidade de ajustar os processos produtivos, tendo resultado calis hidráulicas naturais efectivamente distintas das que anteriormente eram comercializadas com o mesmo nome e que interessa caracterizar, assim como a possível optimização que pode ser alcançada pela utilização de metacaulino na formulação de argamassas com base nestas calis (Faria et al., 2012a; Faria et al., 2012b).

Esta dissertação, que se insere no âmbito do projecto FCT-MEC METACAL, consistiu em avaliar a influência da adição de metacaulino, substituindo parcialmente o ligante, em argamassas de cal hidráulica natural NHL5, classificada de acordo com a última revisão da norma NP EN 459-1: 2011 (IPQ, 2011). Foi também alvo de análise a influência que a humidade relativa (HR) tem na cura dessas argamassas, tendo estado sujeitas a dois tipos de cura: standard Sc, segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999/2006b), em condições de humidade relativa de $65\pm 5\%$; e uma cura húmida Hc, em ambiente com $90\pm 5\%$ de HR. Para além destes parâmetros, as alterações provocadas por diferentes tempos de amassadura foi também analisada, tendo-se realizado um tempo de amassadura de referência Sm, segundo a norma EN 1015-2 (CEN, 1999/2006a), em que a misturadora mecânica actua durante 90s, e uma amassadura mais prolongada Lm, correntemente utilizada nas amassaduras de argamassas realizadas no âmbito do projecto METACAL, em que a misturadora actua durante 180s.

De modo a averiguar a influência destes parâmetros, realizaram-se, no DEC-FCT/UNL, várias argamassas ao traço volumétrico 1:3 de cal hidráulica natural NHL5, que posteriormente foram ensaiadas mecanicamente, fisicamente, quimicamente e mineralogicamente aos 28 e 90 dias de idade.

Os diferentes tempos de amassadura não demonstraram ter grande influência nas características das argamassas, nomeadamente nos ensaios físicos, onde não se verificou qualquer alteração relevante no comportamento das argamassas que apenas diferiam neste aspecto. Na consistência por espalhamento constatou-se que as argamassas de mistura mais prolongada, sem Mk, obtêm maiores valores de espalhamento, não se tendo verificado o mesmo nas argamassas com substituição parcial da cal por pozolana. No entanto, as argamassas resultantes de amassaduras mais prolongadas pareceram apresentar uma melhor ligação e uma menor exsudação da água de amassadura, quando no estado fresco. Os resultados mecânicos indicaram uma ligeira vantagem para o tempo de mistura prolongado, no caso de argamassas de cura húmida com 10% de Mk, apenas aos 28 dias de idade, que se mostraram mais resistentes. Estes resultados foram corroborados pelas análises DRX e dTG, onde se verificou uma mais extensa reacção pozolânica para esta argamassa (Lm_Hc_10Mk) aos 28 dias.

No que diz respeito à influência do tipo de cura nas características das argamassas, ficou bem patente que a cura húmida favorece a obtenção de argamassas mais rígidas e resistentes, não só mecanicamente (justificado pelas suas análises química e mineralógica), mas também face ao ataque por sulfatos, onde demonstraram ser mais resistentes, com maior evidência no caso das argamassas sem metacaulino. No comportamento face à água, as argamassas sujeitas à cura húmida voltam a destacar-se pela positiva absorvendo água de uma forma mais lenta no início dos ensaios (CC sempre inferiores aos das argamassas de cura standard), atingindo VA mais baixos aos 90 dias de idade e sem diferenciação entre curas, na idade mais jovem. Por outro lado, constatou-se que a cura standard beneficia a libertação de água por evaporação por secagem das argamassas, verificando-se um melhor comportamento em relação ao das argamassas de cura húmida (com maior evidência aos 90 dias, nas argamassas sem Mk) que demonstraram ter uma maior dificuldade de secagem (IS superiores), assim como se conclui que a cura standard aparenta ser mais eficaz para se obter um melhor comportamento térmico das argamassas, tendo-se verificado valores de condutibilidade térmica ligeiramente inferiores, em relação à cura com maior HR.

Relativamente à influência do Mk em substituição parcial da cal, conclui-se que a presença da pozolana demonstrou, de um modo geral, uma melhoria nas características das argamassas de mistura prolongada e cura húmida, sendo possível identificar a proporção de 10% como aquela que melhor desempenho demonstrou.

O módulo de elasticidade dinâmico, as resistências mecânicas e a resistência aos sulfatos (com os provetes provenientes dos ensaios aos 28 dias), foram unânimes na demonstração de que a substituição parcial da cal por Mk, até aos 10% em massa, garante uma melhoria evolutiva nas características destas argamassas, tendo-se obtido valores substancialmente superiores comparativamente à argamassa de mistura prolongada e cura húmida, sem metacaulino. A argamassa com maior percentagem de pozolana em substituição do ligante, como se veio a constatar nos ensaios químicos e mineralógicos, não veio dar uma continuidade ao aumento destas características em relação às suas semelhantes com outras proporções de substituição, uma vez que toda a Portlandite foi consumida na

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

reação pozolânica até aos 10% de substituição. Este factor explica também a perda de eficácia do Mk ao longo do tempo, tendo-se verificado um decréscimo nas resistências dos 28 para os 90 dias de idade. Apesar de valores mais altos das características mecânicas, tanto as argamassas com Mk, como aquelas em que não se adicionou a pozolana, seriam adequadas para a utilização em edifícios antigos, de acordo com os parâmetros definidos por Veiga et al. (2010).

As argamassas com metacaulino, ainda que seja pouco perceptível, dado que os resultados de porosidade aberta foram muito similares entre todas as argamassas, parecem ser mais porosas, indo de encontro aos resultados de condutibilidade térmica, onde se constatou um aumento da condutibilidade com a introdução de Mk, até aos 10%, e uma clara melhoria na argamassa Lm_Hc_20Mk, que demonstrou ter o melhor comportamento térmico, com o valor mais baixo de condutibilidade térmica, e o valor mais alto de porosidade aberta. Mais uma vez, os ensaios químicos explicam este comportamento, pela mesma razão acima descrita - sendo o Mk um material poroso, e a parte dele que não participou na reacção com a cal contribuiu para um aumento da porosidade da matriz estrutural desta argamassa.

Em relação ao comportamento face à água, as argamassas com Mk demonstraram absorver-na por capilaridade mais lentamente que a argamassa sem pozolana, sendo a Lm_Hc_10Mk a que menor CC obteve, aos 28 dias. Aos 90 dias de idade, apenas a argamassa com menor quantidade de substituição da cal por Mk demonstrou uma absorção mais lenta que a argamassa sem pozolana. Em ambas as idades, a argamassa sem Mk absorveu menos água que as restantes. A capacidade de secagem das argamassas com Mk foi pior do que a da argamassa sem pozolana, concluindo-se que quanto maior é a percentagem de Mk nas argamassas, mais tempo demoram a secar.

Por fim, comparativamente a outros estudos semelhantes (Faria et al., 2007; Penas, 2008) onde foi utilizada cal hidráulica NHL5 de produção nacional, mas classificada de acordo com a norma antiga (IPQ, 2002a), a cal hidráulica natural NHL5 utilizada na presente dissertação, e classificada de acordo com a nova norma (IPQ, 2011), apresenta um comportamento claramente melhorado relativamente à que antes era comercializada com a mesma designação (Faria et al., 2012c).

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em desenvolvimentos futuros da investigação desenvolvida na presente dissertação, considera-se importante averiguar:

- A evolução das características das argamassas fabricadas, através da realização dos mesmos ensaios a idades mais avançadas (180 dias);
- A análise microestrutural para melhor aferir sobre a estrutura porosa das argamassas;
- As características das argamassas quando aplicadas sobre um suporte poroso;

- As características das argamassas quando introduzidas novas proporções NHL:Mk, nomeadamente entre os 10% e 20% de substituição em massa;
- As características das argamassas quando submetidas a diferentes condições de cura (junto ao mar e/ou noutras condições de exposição natural);
- A adição de outro tipo de pozolanas, nas mesmas proporções, possibilitando uma comparação directa com o presente estudo.

BIBLIOGRAFIA

- Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., & Moropoulou, A.. (2011). Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, 53(1), 15-19.
- Allen, G., & Ball, R. (2012). *Mechanical properties of hydraulic lime mortars*. In APFAC - Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS. 4º Congresso 2012.
- Alvarez, J., Sequeira, C., & Costa, M. (2005). *Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas*. In APFAC - 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa.
- Brito, V. (2009). *Influência nos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil - Reabilitação de Edifícios, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- CEN (1998). EN 1015-6:1998. Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. Brussels.
- CEN (1999). EN 1936:1999. Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, of total and open porosity. Brussels.
- CEN (1999/2004/2006). EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table): Brussels.
- CEN (1999/2006a). EN 1015-2:1999/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels.
- CEN (1999/2006b). EN 1015-11:1999/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry -Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.
- CEN (2002). EN 1015-18:2002. Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.
- CEN (2009). EN 15801:2009. Conservation of cultural property. Test, methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.
- Cerny, R., Kunca, A., Tydlit, V., Drchalova, J., & Rovnanikova, P. (2006). Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials*, 20(10), 849-857.
- Coutinho, J. (2006). *Materiais de Construção 2: 1ª Parte - Ligantes e Caldas*. Porto: Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto.
- Edwards, D., Allen, G., Ball, R., & El-Turki, A. (2007). Pozzolanic properties of glass fines in lime mortars. *Advances in Applied Ceramics*, 106(6), 309-313.
- Faria, P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Faria, P. (2011). *Procedimentos de ensaio - Argamassa base - METACAL*. Departamento Eng. Civil, FCT-UNL.

Bibliografia

- Faria, P., Branco, T., Carneiro, J., Veiga, R., & Santos Silva, A. (2012a). *Argamassas com base em cal para reabilitação de rebocos*. In PATORREB 2012 - 4º Congresso de Patologia e Reabilitação de Edifícios (CD-ROM).
- Faria, P., Henriques, F., & Rato, V. (2007). *Argamassas correntes: influência do tipo de ligante e do agregado*. In APFAC - Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS. 2º Congresso 2007, Lisboa.
- Faria, P., Silva, V., Carneiro, J., Branco, T., Mergulhão, D., & Antunes, R. (2012b). *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*. Paper presented at the CIReA 2012 - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria, 28-38.
- Faria, P., Silva, V., & Flores-Colen, I. (2012c). *Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. In APFAC - Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS (CD-ROM).
- Felgueiras, N. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino sujeitas a ambientes de diferente humidade relativa*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil - Construção, Universidade de Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias.
- Gameiro, A., Santos Silva, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2012). Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochimica Acta*, 535, 36-41.
- IPQ (2000). NP EN 933-1:2000. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Monte da Caparica.
- IPQ (2001). NP EN 12370:2001. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais. Monte da Caparica.
- IPQ (2002a). NP EN 459-1:2002. Cal de construção. Parte 1 - Definições, especificações e critérios de conformidade. Monte da Caparica.
- IPQ (2002b). NP EN 1097-3:2000/2002. Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Método para determinação da massa volumica e dos vazios. Monte da Caparica.
- IPQ (2006). NP EN 196-1:2006. Métodos de cimentos. Parte 1 - Determinação das resistências mecânicas. Monte da Caparica.
- IPQ (2006). NP EN 14146:2006. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Monte da Caparica.
- IPQ (2010). NP 4220:2010. Pozolanas para betão, argamassas e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade.
- IPQ (2011). NP EN 459-1:2011. Cal de construção. Parte 1 - Definições, especificações e critérios de conformidade. Monte da Caparica.
- ISO (2000). ISO 3310-1:2000. Test Sieves - Technical requirements testing - Part 1: Test Sieves of metal wire cloth. Switzerland.
- Karatasios, I., Kilikoglou, V., Theoulakis, P., Colston, B., & Watt, D. (2008). Sulphate resistance of lime-based barium mortars. *Cement & Concrete Composites*, 30(9), 815-821.

- Lanas, J., & Alvarez, J. (2003). Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867-1876.
- Lanas, J., Bernal, J., Bello, M., & Galindo, J. (2004). Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2191-2201.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577-1586.
- Massena, R. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil - Construção, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Melo, K., & Carneiro, A. (2010). Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1529-1535.
- Penas, F. (2008). *Argamassas de cal hidráulica para revestimentos de paredes*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Pinto, A. (2004). *Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino*. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia - Universidade do Minho.
- Rato, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- RILEM, TC 25-PEM. (1980). Recommended tests to measure the deterioration of stone and to asses the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 - Evaporation curve. *Materials & Structures* 13.
- Said-Mansour, M., Kadri, E., Kenai, S., Ghrici, M., & Bennaceur, R. (2011). Influence of calcined kaolin on mortar properties. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2275-2282.
- Sequeira, A., Dina, F., & Gonçalves, P. (2007). *Cal Hidráulica - Um ligante para reabilitação*. In Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS.
- Stefanidou, M. (2010). Methods for porosity measurement in lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2572-2578.
- Veiga, M., Fragata, A., Velosa, A., Magalhães, A., & Margalha, G. (2010). Lime-Based Mortars: Viability for Use as Substitution Renders in Historical Buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(2), 177-195.
- Veiga, M., & Carvalho, F. (1994). *Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano*. Paper presented at the 2º ENCORE, Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios, Lisboa.
- Vejmelkova, E., Keppert, M., Kerner, Z., Rovnanikova, P., & Cerny, R.. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 31, 22-28.
- Velosa, A. (2006). *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Velosa, A., Rocha, F., & Veiga, M. (2009). Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, 6(1), 121-126.

ANEXO I – DADOS CLIMÁTICOS DA SALA DE CURA HÚMIDA



Figura I.I – Dados climáticos da sala de cura húmida.

**ANEXO II – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS
ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO**

Quadro I – Massa volúmica.

	Massa (kg)
Copo s/ acrílico	0,6698
Copo c/ acrílico	1,0463
Copo c/ água e acrílico	1,7953
Água	0,749

	Massa (kg)	Vol água (ml)	Massa vol (kg/m³)
Copo c/ J1 Exp (1ª)	2,2121	564	2055
Copo c/ J1 Exp (2ª)	2,215		2059

Temp. Água (°C)	21
Massa vol (kg/dm³)	0,997975
Vol copo (dm³)	0,7505198

Quadro II – Amassadura Experimental.

	Vol (cm3)		Massa (g)
1 vol	400	Ar 12	564,8
1,5 vol	600	Ar20	843
1,5 vol	600	Ar30	832,8
1,33 vol	533,3	Ch	437,9

Argamassa	Massa (g)					Vol.água (ml)
	Ar 12	Ar 20	Ar 30	Mk	Lime	
J1 Exp	564,8	843	832,8	0,0	437,9	500+65

Espalhamento (mm)	Média (mm)
142	144
141	
148	

Quadro III – Consistência por espalhamento das argamassas.

Argamassa		Volume de água (ml)	Tempo de juntar água (s)	Tempo de amassadura (s)		Espalhamento (mm)	Espalhamento médio (mm)	D.P. (mm)
Lm_Hc	J1	950	32	150	30	171	175	5
						180		
						175		
Lm_Hc_2	J9	950	22	150	30	165	160	6
						154		
						165		
						155		
Sm_Sc	J2	950	20	90		180	174	9
						167		
						165		
						183		
Sm_Sc_2	J10	950	20	90		158	158	3
						154		
						159		
						161		
Sm_Hc	J3	950	25	90		147	147	5
						147		
						141		
						150		
						143		
						141		
						149		
						155		
Sm_Hc_10Mk	J4	950	24	90		140	143	4
						149		
						140		
						143		
Sm_Sc_10Mk	J5	950	25	90		135	139	3
						138		
						141		
						142		
Lm_Hc_5Mk	J6	950	16	150	30	149	149	3
						145		
						151		
						151		
Lm_Hc_10Mk	J7	950	25	150	30	138	139	2
						136		
						140		
						141		
Lm_Hc_20Mk	J8	950	40	150	30	130	130	0
						130		
						130		
						130		

Quadro IV – Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 28 dias.

Argamassa	Provete.	Massa [g]	E [Mpa]								Média prov. [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média argamassa [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
			E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈				
Lm_Hc	J1-1	500,97	4225	4139	4129	4079					4143	60,6	4256,3	115
	J1-2	504,56	4324	4272	4261	4289					4287	27,5		
	J1-3	506,13	4290	4229	4271	4092					4221	89,4		
	J1-4	495,38	4504	4331	4445	4303					4396	94,8		
	J1-5	496,24	4123	4118	4147	4155					4136	18,0		
	J1-6	507,47	4372	4361	4314	4377					4356	28,8		
Sm_Sc	J2-1	473,11	2229	2556	2582	2567	2544	2244	2210		2419	179,5	2190,5	245
	J2-2	473,25	2420	2460	2370	2262					2378	85,7		
	J2-3	473,96	2084	2404	2441	2181	2033	2447	2155	2396	2268	171,7		
	J2-4	477,15	2170	2130	2145	2085					2133	35,7		
	J2-5	476,17	2142	2150	2152	2133					2144	8,7		
	J2-6	476,72	1726	1898	1729	1929	1883	1712	1908		1826	98,5		
Sm_Hc	J3-1	499,34	4058	3843	4050	4093	3823	4106			3996	127,8	4155,8	174
	J3-2	507,40	4100	4347	4424	4282	4335				4298	121,6		
	J3-3	502,81	4203	4389	4076	4146	4073	4300			4198	126,6		
Sm_Hc_10Mk	J4-1	508,61	7052	7056	7077	7050					7059	12,4	7692,8	491
	J4-2	512,65	7862	7822	7836	7828					7837	17,6		
	J4-3	513,51	8214	8212	8143	8161					8183	36,0		
Sm_Sc_10Mk	J5-1	467,28	2119	2093	2139	2097					2112	21,3	1991,2	166
	J5-2	468,96	2121	2134	2112	2106					2118	12,2		
	J5-3	467,03	1936	1763	1916	1855	1615	1871			1826	119,6		
Lm_Hc_5Mk	J6-1	510,08	7553	7115	7607	7590					7466	235,2	7611,6	172
	J6-2	508,15	7562	7645	7660	7659					7632	46,8		
	J6-3	516,17	7721	7732	7785	7710					7737	33,2		
Lm_Hc_10Mk	J7-1	504,19	8935	8935	8889	8895					8914	24,9	8946,0	573
	J7-2	504,09	8263	8295	8316	8289					8291	21,8		
	J7-3	509,31	9653	9625	9635	9622					9634	14,0		
Lm_Hc_20Mk	J8-1	493,34	4020	4038	4062	3968					4022	39,9	4044,4	73
	J8-2	486,37	3912	4024	4071	4000					4002	66,7		
	J8-3	493,43	4010	4132	4167	4129					4110	68,5		

Quadro V - Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 90 dias.

Argamassa	Provete	Massa [g]	E [Mpa]								Média prov. [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média argamassa [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
			E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8				
Lm_Hc	J1-4	483,55	3856	3964	3946	4026					3948	70,3	3693,6	199
	J1-5	480,13	4362	4373	4334	4373					4361	18,4		
	J1-6	482,14	4341	4318	4345	4307					4328	18,2		
	J1-7	476,97	3862	3786	3571	3827					3762	130,7		
	J1-8	476,95	2983	2908	2902	2915					2927	37,7		
	J1-9	473,77	3032	3031	2986	3010	2983				3008	23,5		
Sm_Sc	J2-4	476,04	1944	1886	1918	1774					1881	74,9	1689,8	114
	J2-5	473,64	1659	1621	1797	1831	1641	1804			1726	94,7		
	J2-6	476,76	1721	1877	1686	1921	1903	1721	1646	1940	1802	119,5		
	J2-7	475,18	1490	1485	1484	1483	1478	1507			1488	10,1		
	J2-8	469,02	1593	1580	1577	1575	1570	1581			1579	7,8		
	J2-9	466,31	1605	1628	1577	1569	1587				1593	23,6		
Sm_Hc	J3-4	490,33	4546	4580	4533	4511					4543	28,9	4284,0	209
	J3-5	486,97	4265	4265	4299	4278	4273				4276	14,0		
	J3-6	487,14	4090	4022	3995	4035					4036	40,0		
Sm_Hc_10Mk	J4-4	487,40	4464	4337	4388	4386	4410				4397	46,0	4445,1	213
	J4-5	486,85	4610	4410	4610	4814	4598	4813	4576		4633	141,7		
	J4-6	479,92	4213	4122	4183	4188					4177	38,6		
Sm_Sc_10Mk	J5-4	466,57	1578	1491	1454	1434					1489	63,7	1499,3	44
	J5-5	467,75	1523	1525	1527	1534					1527	4,8		
	J5-6	466,22	1482	1532	1465	1447					1482	36,6		
Lm_Hc_5Mk	J6-4	494,45	4518	4476	4484	4495					4493	18,2	4719,5	173
	J6-5	494,22	4827	4886	4730	4872					4829	70,5		
	J6-6	482,76	4873	4809	4798	4866					4837	38,5		
Lm_Hc_10Mk	J7-4	470,19	4280	4229	4204	4229					4236	31,9	4260,3	145
	J7-5	475,09	4479	4470	4379	4416					4436	47,1		
	J7-6	469,93	4115	4128	4136	4058					4109	35,2		
Lm_Hc_20Mk	J8-4	468,49	3573	3543	3507	3541					3541	27,0	3523,2	71
	J8-5	470,48	3563	3605	3639	3510					3579	55,7		
	J8-6	467,56	3462	3603	3406	3414	3503	3456			3474	72,4		

Quadro VI – Resistências mecânicas aos 28 dias.

<i>Argamassa</i>	<i>Provete</i>	<i>Ft [N]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Fc [N]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Rt_{provete} [MPa]</i>	<i>R_{c provete} [MPa]</i>	<i>Rt_{arg} [MPa]</i>	<i>R_{c arg} [MPa]</i>	<i>D. P. Rt [MPa]</i>	<i>D. P. Rc [MPa]</i>
Lm_Hc	J1-1	173,700	61	1482,560	680	0,407	0,927	0,523	0,919	0,104	0,064
	J1-2	187,690	34	1544,800	493	0,440	0,966				
	J1-3	192,990	42	1550,210	109	0,452	0,969				
	J1-4	284,530	75	1552,320	73	0,667	0,970				
	J1-5	250,320	31	1386,350	72	0,587	0,866				
	J1-6	249,830	74	1309,740	116	0,586	0,819				
Sm_Sc	J2-1	121,700	38	800,810	33	0,285	0,501	0,287	0,426	0,034	0,092
	J2-2	117,210	30	792,280	39	0,275	0,495				
	J2-3	100,540	42	838,910	40	0,236	0,524				
	J2-4	138,250	58	612,440	31	0,324	0,383				
	J2-5	139,770	42	493,220	69	0,328	0,308				
	J2-6	118,370	36	555,480	51	0,277	0,347				
Sm_Hc	J3-1	150,160	24	1373,060	83	0,352	0,858	0,394	0,865	0,041	0,076
	J3-2	169,360	62	1511,080	75	0,397	0,944				
	J3-3	184,910	51	1267,110	74	0,433	0,792				
Sm_Hc_10Mk	J4-1	241,830	29	3872,720	55	0,567	2,420	0,608	2,556	0,036	0,158
	J4-2	270,460	41	4027,180	58	0,634	2,517				
	J4-3	266,070	30	4368,150	54	0,624	2,730				
Sm_Sc_10Mk	J5-1	111,800	29	2665,980	61	0,262	1,666	0,285	1,676	0,020	0,166
	J5-2	126,660	92	2955,950	66	0,297	1,847				
	J5-3	125,800	79	2424,510	65	0,295	1,515				
Lm_Hc_5Mk	J6-1	224,060	32	2997,590	63	0,525	1,873	0,527	1,911	0,005	0,106
	J6-2	227,080	28	3248,840	61	0,532	2,031				
	J6-3	222,960	31	2927,230	71	0,523	1,830				
Lm_Hc_10Mk	J7-1	345,450	61	4649,590	51	0,810	2,906	0,787	2,925	0,068	0,228
	J7-2	302,970	37	4330,470	96	0,710	2,707				
	J7-3	358,570	50	5058,010	54	0,840	3,161				
Lm_Hc_20Mk	J8-1	180,550	38	3286,520	67	0,423	2,054	0,446	1,991	0,022	0,091
	J8-2	199,540	41	3250,510	74	0,468	2,032				
	J8-3	190,790	53	3019,450	63	0,447	1,887				

Quadro VII - Resistências mecânicas aos 90 dias.

<i>Identificação Argamassa</i>	<i>Identificação Provete</i>	<i>Ft</i> [N]	<i>Tempo</i> [s]	<i>Fc</i> [N]	<i>Tempo</i> [s]	<i>Rt_{provete}</i> [MPa]	<i>R_{c provete}</i> [MPa]	<i>Rt_{arg}</i> [MPa]	<i>R_{c arg}</i> [MPa]	<i>Dv. Padrão Rt</i> [MPa]	<i>Dv. Padrão Rc</i> [MPa]
Lm_Hc	J1-4	170,000	17	1822,000	40	0,398	1,139	0,371	1,233	0,097	0,266
	J1-5	229,000	23	2349,000	54	0,537	1,468				
	J1-6	166,000	16	2559,000	64	0,389	1,599				
	J1-7	145,000	14	2043,000	45	0,340	1,277				
	J1-8	110,000	11	1554,000	45	0,258	0,971				
	J1-9	129,000	12	1510,000	41	0,302	0,944				
Sm_Sc	J2-4	74,000	8	679,000	16	0,173	0,424	0,143	0,383	0,048	0,027
	J2-5	61,000	7	598,000	17	0,143	0,374				
	J2-6	88,000	11	632,000	19	0,206	0,395				
	J2-7	43,000	5	610,000	31	0,101	0,381				
	J2-8	40,000	5	547,000	24	0,094	0,342				
	J2-9			613,000	36	0,000	0,383				
Sm_Hc	J3-4	89,000	8	2121,000	45	0,209	1,326	0,396	1,281	0,296	0,042
	J3-5	249,000	32	1986,000	45	0,584	1,241				
	J3-6			2042,000	50	0,000	1,276				
Sm_Hc_10Mk	J4-4	156,000	18	3961,000	90	0,366	2,476	0,349	2,344	0,089	0,182
	J4-5	108,000	11	3872,000	72	0,253	2,420				
	J4-6	183,000	18	3418,000	63	0,429	2,136				
Sm_Sc_10Mk	J5-4	17,000	3	1825,000	41	0,040	1,141	0,116	1,075	0,067	0,102
	J5-5	59,000	6	1804,000	45	0,138	1,128				
	J5-6	72,000	7	1532,000	41	0,169	0,958				
Lm_Hc_5Mk	J6-4	264,000	27	3682,000	81	0,619	2,301	0,609	2,319	0,024	0,017
	J6-5	267,000	27	3717,000	75	0,626	2,323				
	J6-6	248,000	25	3734,000	90	0,581	2,334				
Lm_Hc_10Mk	J7-4	246,000	25	4115,000	85	0,577	2,572	0,480	2,384	0,113	0,168
	J7-5	217,000	23	3730,000	80	0,509	2,331				
	J7-6	152,000	15	3597,000	63	0,356	2,248				
Lm_Hc_20Mk	J8-4	238,000	23	3590,000	75	0,558	2,244	0,590	2,323	0,037	0,115
	J8-5	248,000	25	3928,000	72	0,581	2,455				
	J8-6	269,000	27	3632,000	72	0,630	2,270				

Quadro VIII – Condutibilidade térmica.

Argamassa	Provete	λ [W/mK]			λ Méd Provete	D.P. Provete	λ Méd Argamassa	D.P. Argamassa
		1ª leitura	2ª leitura	3ª leitura				
Lm_Hc	J1-1	0,703	0,695	0,646	0,681	0,031	0,687	0,053
	J1-2	0,65	0,64	0,609	0,633	0,021		
	J1-3	0,731	0,754	0,755	0,747	0,014		
Sm_Sc	J2-1	0,671	0,709	0,636	0,672	0,037	0,650	0,037
	J2-2	0,635	0,598	0,615	0,616	0,019		
	J2-3	0,694	0,627	0,669	0,663	0,034		
Sm_Hc	J3-1	0,695	0,694	0,695	0,695	0,001	0,705	0,018
	J3-2	0,739	0,694	0,714	0,716	0,023		
Sm_Hc_10Mk	J4-1	0,679	0,683	0,697	0,686	0,009	0,697	0,014
	J4-2	0,702	0,716	0,707	0,708	0,007		
Sm_Sc_10Mk	J5-1	0,679	0,658	0,638	0,658	0,021	0,646	0,022
	J5-2	0,624	0,624	0,654	0,634	0,017		
Lm_Hc_5Mk	J6-1	0,742	0,72	0,718	0,727	0,013	0,728	0,040
	J6-2	0,769	0,776	0,73	0,758	0,025		
	J6-3	0,731	0,731	0,636	0,699	0,055		
Lm_Hc_10Mk	J7-1	0,723	0,718	0,707	0,716	0,008	0,704	0,026
	J7-2	0,675	0,674	0,67	0,673	0,003		
	J7-3	0,745	0,707	0,715	0,722	0,020		
Lm_Hc_20Mk	J8-1	0,623	0,602	0,659	0,628	0,029	0,623	0,022
	J8-2	0,607	0,609	0,657	0,624	0,028		
	J8-3	0,612	0,608	0,627	0,616	0,010		

Quadro IX – Porosidade aberta aos 28 dias.

<i>Identificação Argamassa</i>	<i>Identificação Provetes</i>	<i>Massa [g]</i>			<i>Porosid. Ab. Prov</i>	<i>Poros. aberta argamassa</i>	<i>Dv. Padrão</i>
		<i>M₁</i>	<i>M₂</i>	<i>M₃</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
Lm_Hc	J1-1	64,680	39,769	74,633	28,5	28,0	0,7
	J1-2	48,571	29,912	56,039	28,6		
	J1-3	67,786	41,735	78,300	28,8		
	J1-4	55,273	33,958	63,317	27,4		
	J1-5	66,930	41,014	76,774	27,5		
	J1-6	62,017	38,017	71,043	27,3		
Sm_Sc	J2-1	53,263	32,679	60,817	26,8	26,5	0,7
	J2-2	36,609	22,418	41,754	26,6		
	J2-3	70,556	43,250	80,785	27,3		
	J2-4	29,213	17,928	33,064	25,4		
	J2-5	34,654	14,352	26,346	-69,3		
	J2-6	59,299	36,420	67,501	26,4		
Sm_Hc	J3-1	51,988	31,884	59,750	27,9	27,9	0,5
	J3-2	66,219	40,563	75,940	27,5		
	J3-3	51,684	31,872	59,538	28,4		
Sm_Hc_10Mk	J4-1	68,698	42,045	79,366	28,6	28,7	0,6
	J4-2	68,644	41,848	79,137	28,1		
	J4-3	71,169	43,565	82,584	29,3		
Sm_Sc_10Mk	J5-1	58,358	35,725	67,655	29,1	29,3	0,3
	J5-2	56,323	34,535	65,292	29,2		
	J5-3	72,299	44,169	84,142	29,6		
Lm_Hc_5Mk	J6-1	63,176	38,840	72,904	28,6	28,4	0,2
	J6-2	52,633	32,327	60,614	28,2		
	J6-3	58,067	35,778	66,917	28,4		
Lm_Hc_10Mk	J7-1	53,143	32,570	61,515	28,9	28,7	0,6
	J7-2	59,532	36,454	68,550	28,1		
	J7-3	53,903	32,994	62,504	29,1		
Lm_Hc_20Mk	J8-1	70,005	42,382	81,451	29,3	29,5	0,3
	J8-2	47,845	28,935	55,671	29,3		
	J8-3	49,922	30,247	58,273	29,8		

Quadro X – Porosidade aberta aos 90 dias.

<i>Identificação Argamassa</i>	<i>Identificação Provetes</i>	<i>Massa [g]</i>			<i>Porosid. Ab. Prov</i>	<i>Poros. aberta argamassa</i>	<i>Dv. Padrão</i>
		<i>M₁</i>	<i>M₂</i>	<i>M₃</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
Lm_Hc	J1-4	31,676	18,749	36,718	28,1	32,1	5,1
	J1-5	78,647	47,248	91,258	28,7		
	J1-6	71,728	42,277	84,125	29,6		
	J1-7	17,371	10,326	22,424	41,8		
	J1-8	61,319	35,138	73,461	31,7		
	J1-9	57,953	34,244	69,515	32,8		
Sm_Sc	J2-4	60,854	36,253	71,493	30,2	35,6	4,2
	J2-5	23,691	14,048	28,960	35,3		
	J2-6	29,102	17,291	35,780	36,1		
	J2-7	18,322	10,765	23,971	42,8		
	J2-8	63,774	37,815	76,736	33,3		
	J2-9	64,948	38,445	79,836	35,9		
Sm_Hc	J3-4	74,996	44,233	87,920	29,6	30,1	1,3
	J3-5	68,511	40,525	80,051	29,2		
	J3-6	59,762	35,634	70,891	31,6		
Sm_Hc_10Mk	J4-4	59,927	35,289	71,809	32,5	32,3	1,3
	J4-5	68,430	40,213	82,577	33,4		
	J4-6	83,072	49,196	98,235	30,9		
Sm_Sc_10Mk	J5-4	48,171	28,486	57,709	32,6	32,6	0,6
	J5-5	56,091	33,159	66,915	32,1		
	J5-6	63,777	37,904	76,627	33,2		
Lm_Hc_5Mk	J6-4	42,834	25,619	51,960	34,6	34,6	0,0
	J6-5	69,699	31,273	63,314	-19,9		
	J6-6	52,719	41,700	82,987	73,3		
Lm_Hc_10Mk	J7-4	39,611	23,389	49,086	36,9	33,6	3,0
	J7-5	67,573	40,182	80,853	32,7		
	J7-6	70,941	42,097	84,002	31,2		
Lm_Hc_20Mk	J8-4	50,987	29,848	62,646	35,5	34,7	0,7
	J8-5	66,491	39,607	80,407	34,1		
	J8-6	54,178	32,266	65,736	34,5		

Valores excluídos

ANEXO III – ENSAIOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS

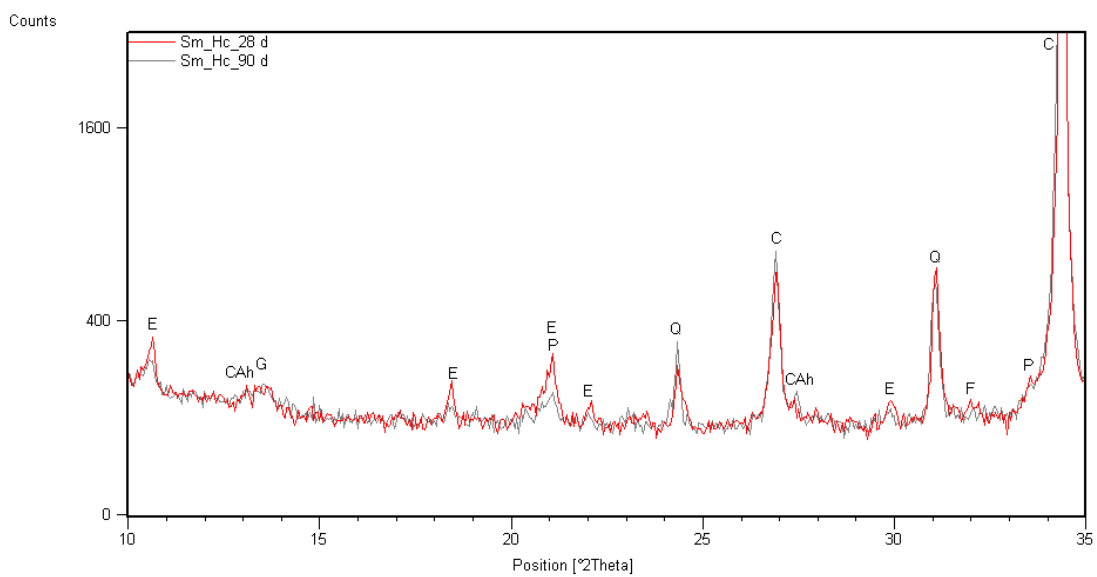


Figura III.I - DRX das argamassas Sm_Hc aos 28 e 90 dias

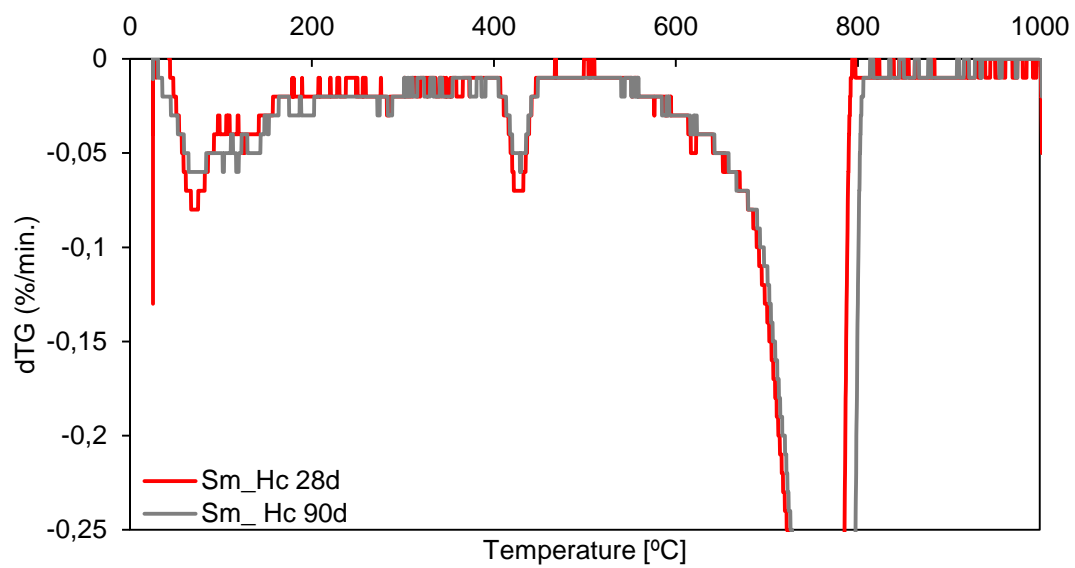


Figura III.II - dTG das argamassas Sm_Hc aos 28 e 90 dias.

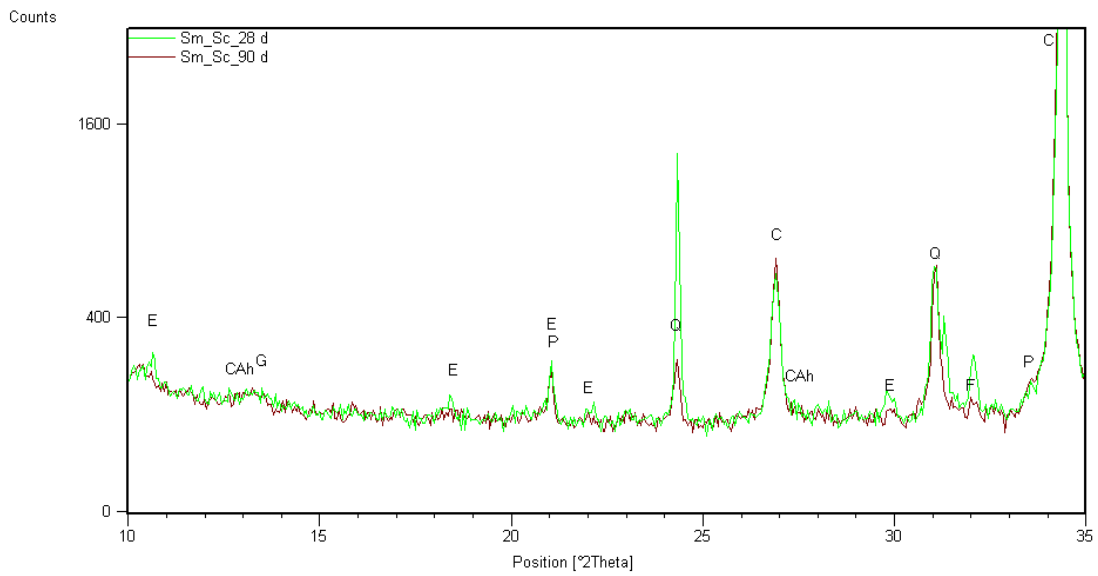


Figura III.III – DRX das argamassas Sm_Sc aos 28 e 90 dias

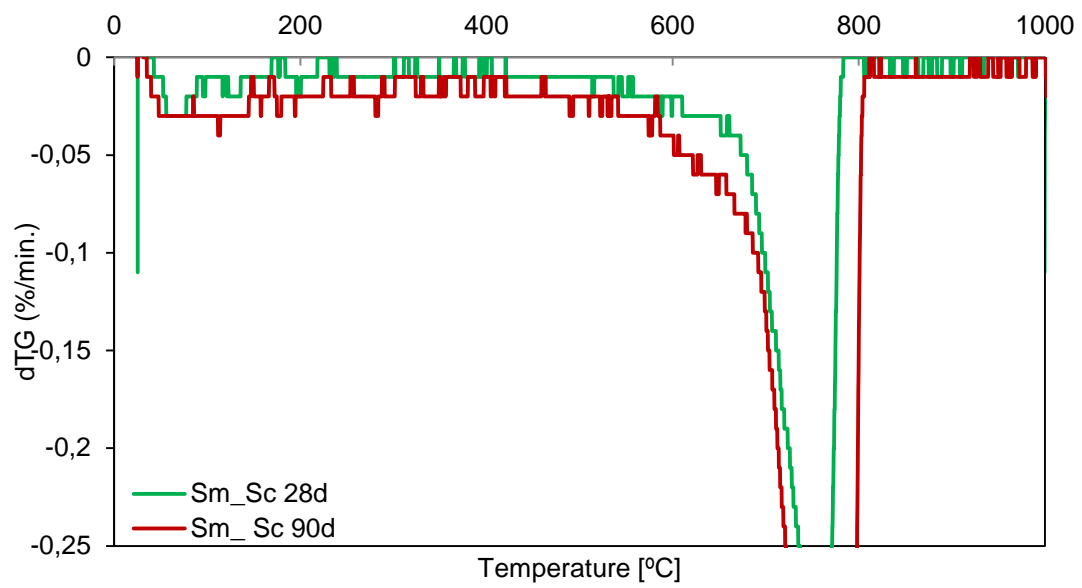


Figura III.IV – dTG das argamassas Sm_Sc aos 28 e 90 dias

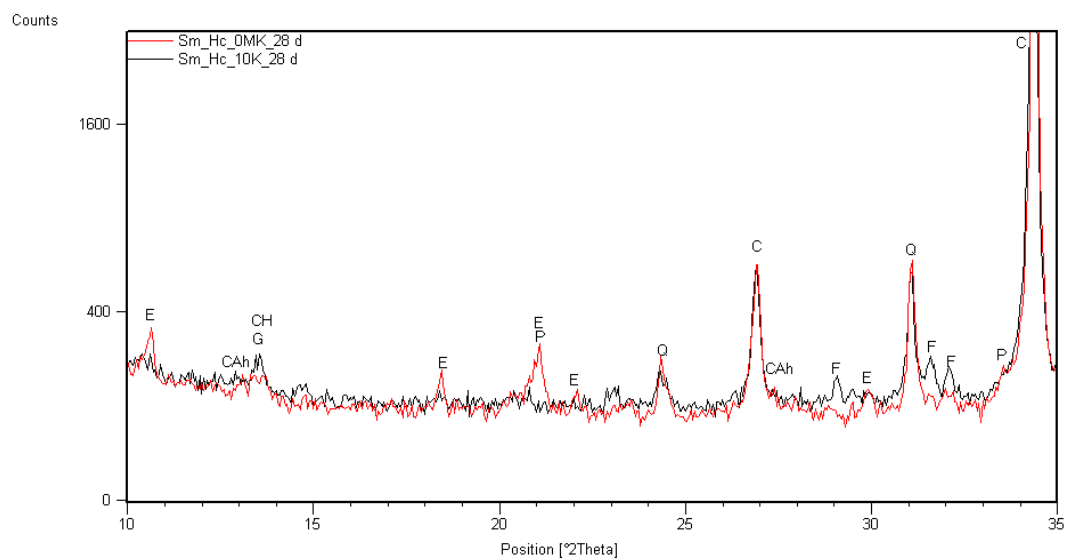


Figura III.V – DRX das argamassas Sm_Hc e Sm_Hc_10Mk aos 28 dias

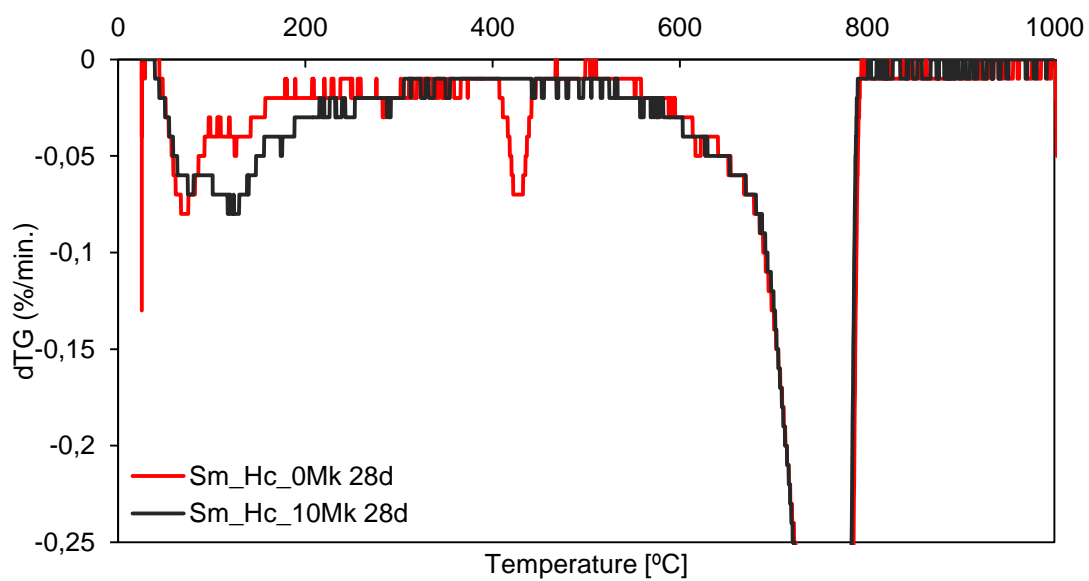


Figura III.VI – dTG das argamassas Sm_Hc e Sm_Hc_10Mk aos 28 dias

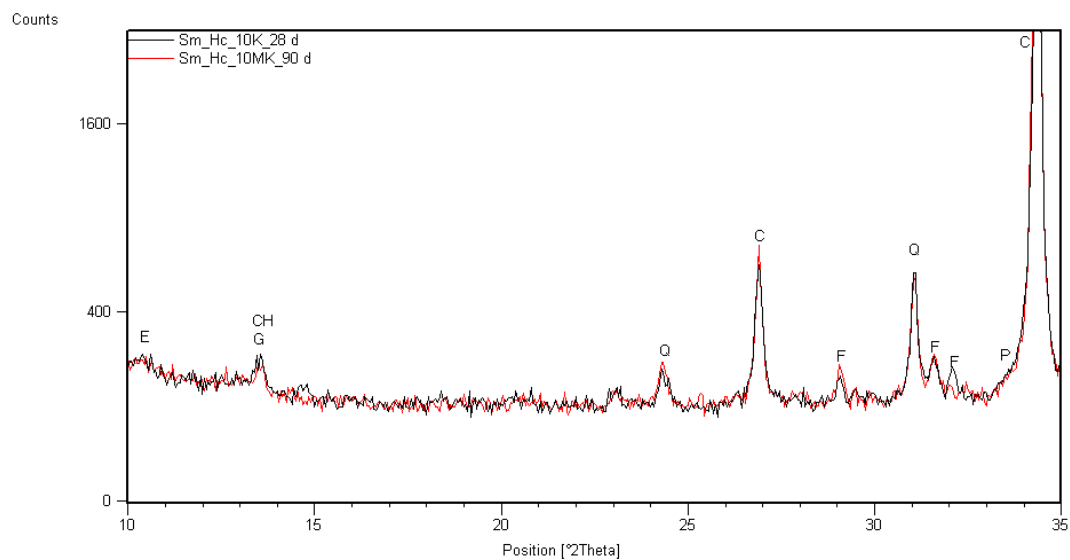


Figura III.VII – DRX das argamassas Sm_Hc_10Mk aos 28 e 90 dias

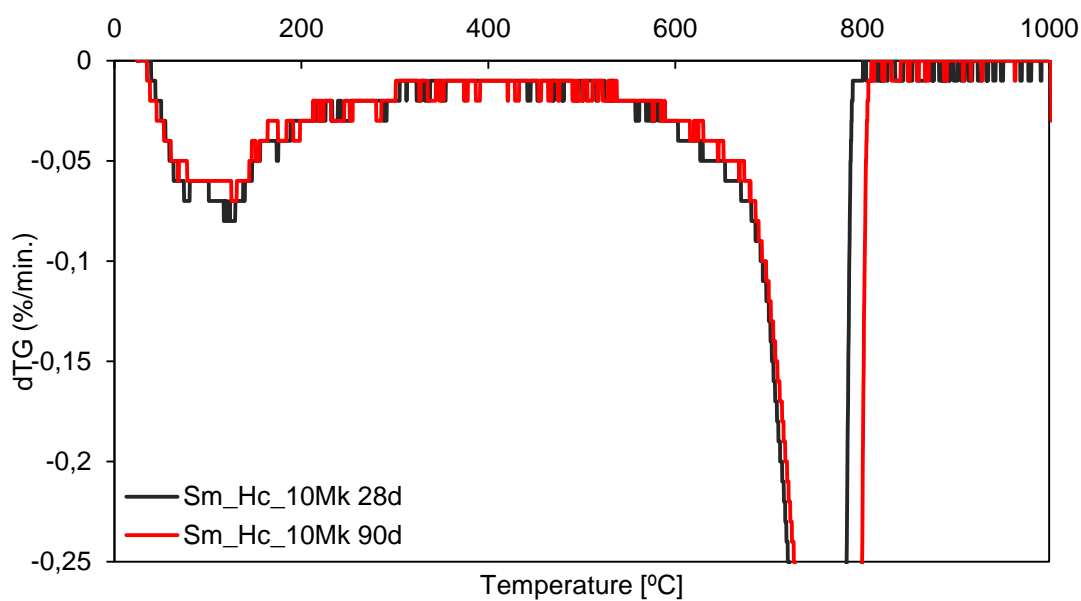


Figura III.VIII – dTG das argamassas Sm_Hc_10Mk aos 28 e 90 dias

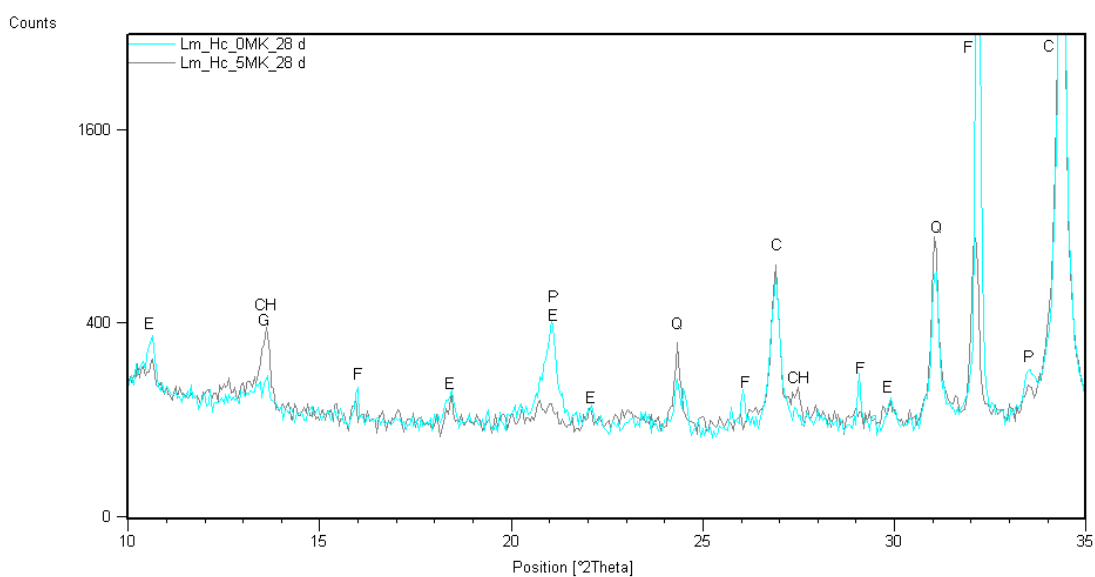


Figura III.IX – DRX das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5Mk aos 28 dias

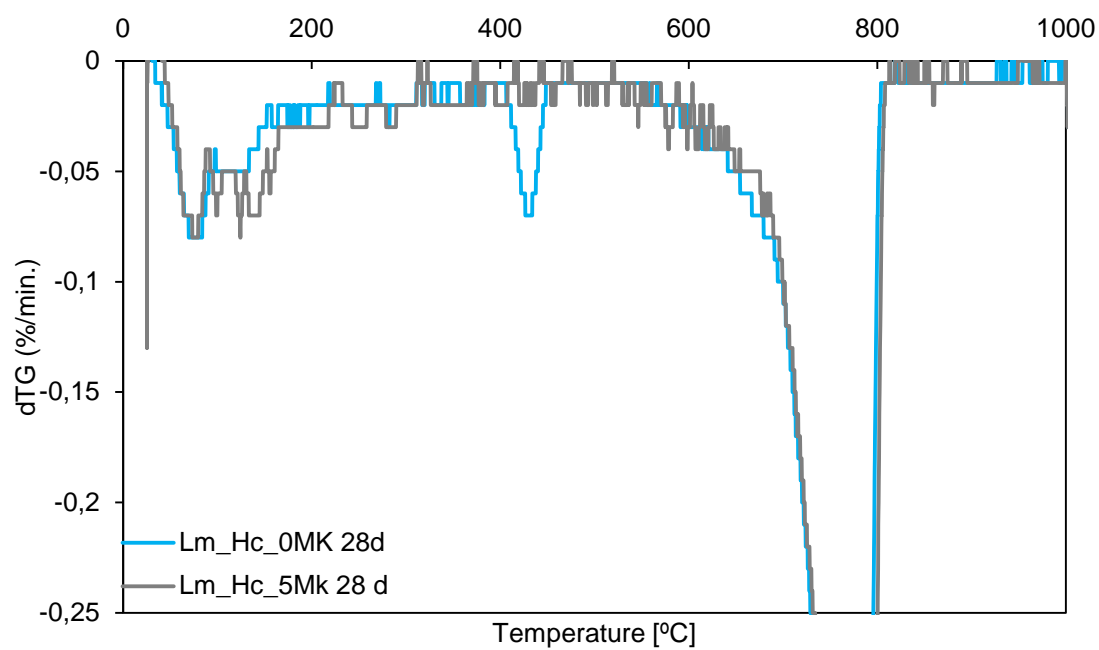


Figura III.X – dTG das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5Mk aos 28 dias

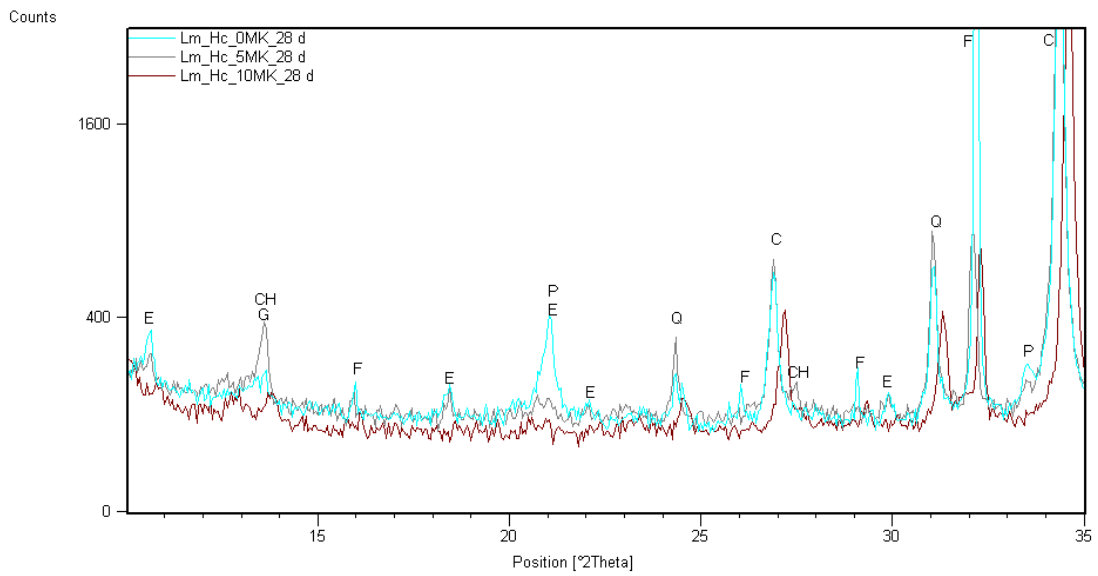


Figura III.XI – DRX das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10Mk aos 28 dias

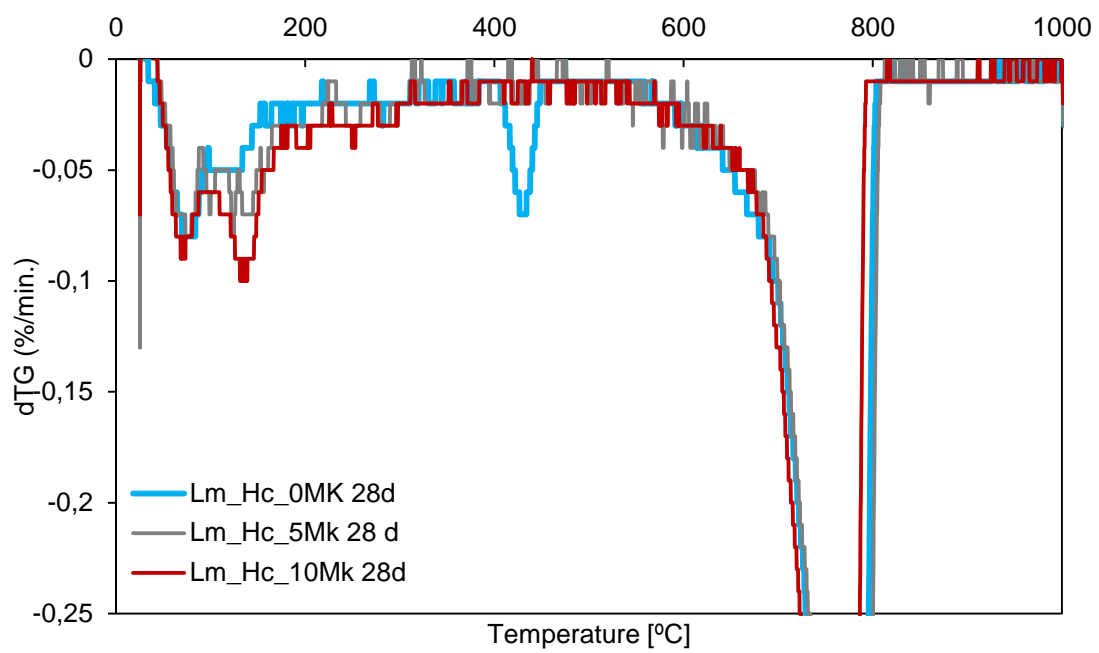


Figura III.XII - dTG das argamassas Lm_Hc e Lm_Hc_5/10Mk aos 28 dias

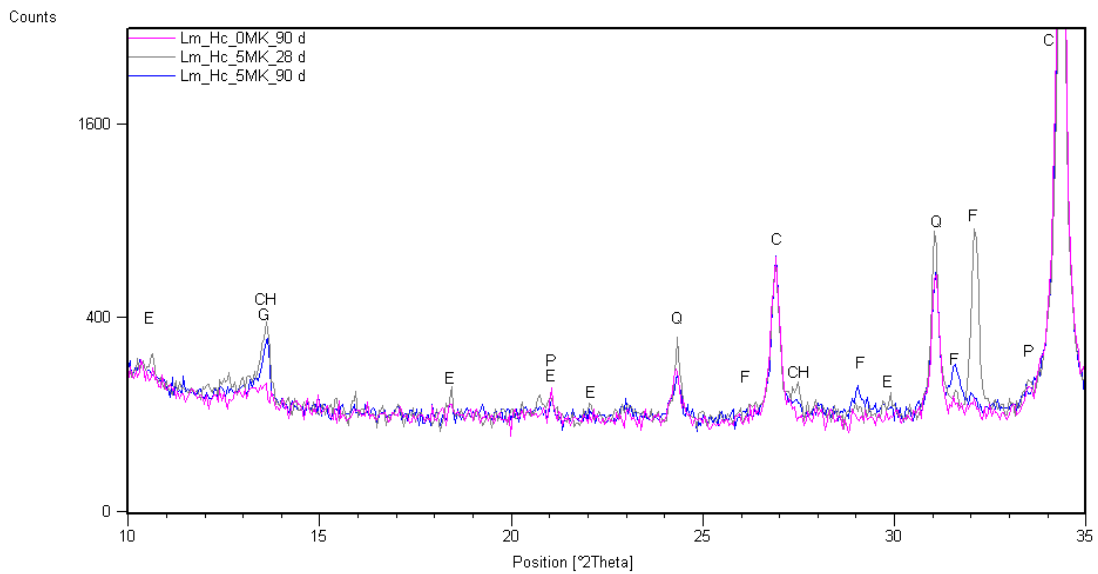


Figura III.XIII – DRX das argamassas Lm_Hc aos 90 dias e Lm_Hc_5Mk nas duas idades de ensaio

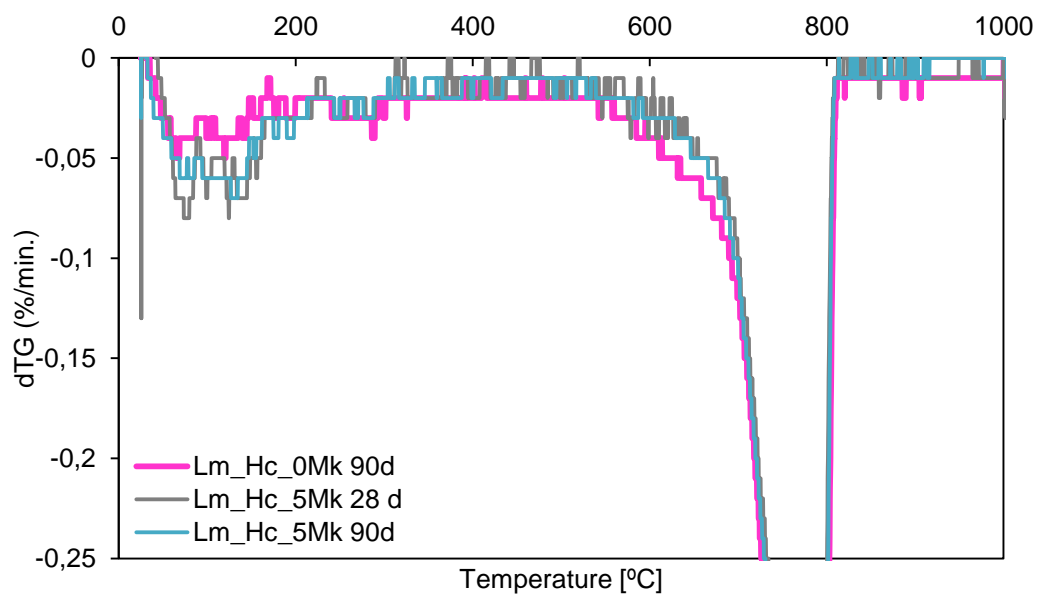


Figura III.XIV – dTG das argamassas Lm_Hc aos 90 dias e Lm_Hc_5Mk nas duas idades de ensaio

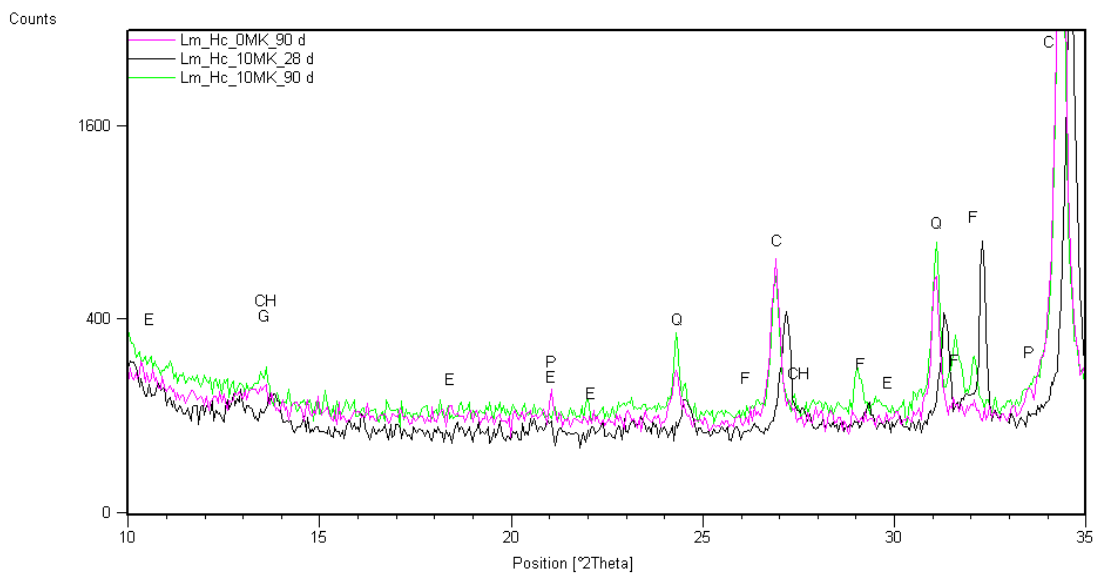


Figura III.XV – DRX das argamassas Lm_Hc aos 90 dias e Lm_Hc_10Mk nas duas idades de ensaio

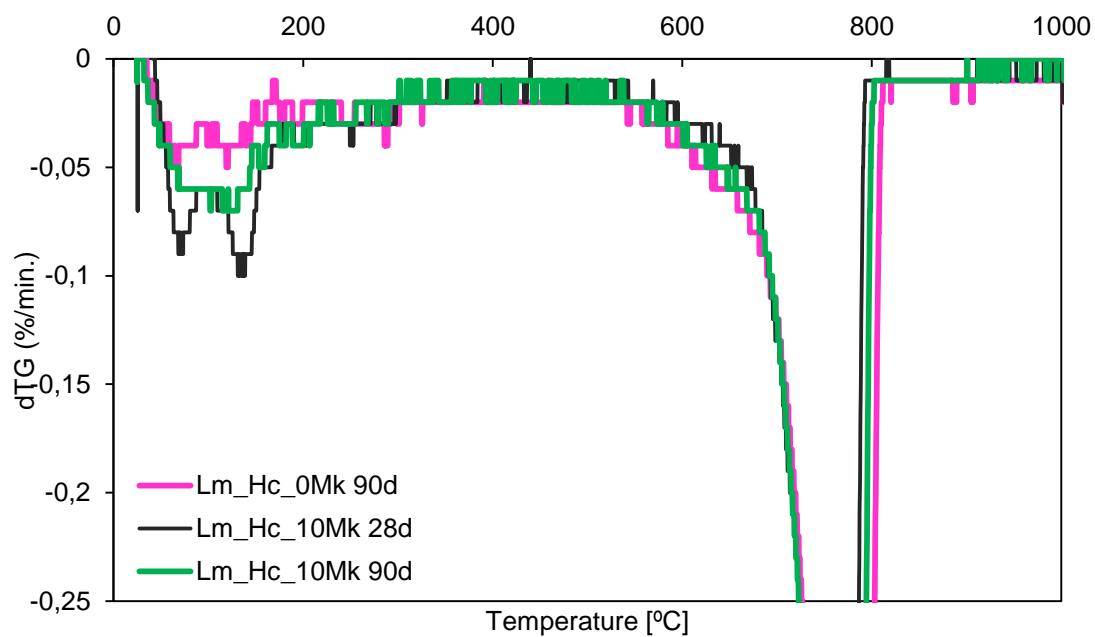


Figura III.XVI – dTG das argamassas Lm_Hc aos 90 dias e Lm_Hc_10Mk nas duas idades de ensaio

ANEXO IV – FICHA TÉCNICA NHL5

Secil NATURAL LIME NHL5

NHL 5 - CAL HIDRÁULICA NATURAL

TC.E.077.1

1. DESCRIÇÃO

A **Secil NATURAL LIME NHL 5** é um ligante hidráulico constituído maioritariamente por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio. Obtém-se por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem.

A **Secil NATURAL LIME NHL 5** é classificada como NHL 5 segundo a NP EN 459-1.

A **Secil NATURAL LIME NHL 5** é um ligante singular, pois além da presa hidráulica, apresenta também presa por carbonatação.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

Na fabricação de argamassas, como único ligante ou em mistura com outros ligantes hidráulicos ou aéreos, conferindo-lhes trabalhabilidade e flexibilidade, reduzindo significativamente a retração das argamassas hidráulicas (p.ex: argamassas de alvenaria, argamassa de reboco e acabamentos);

Na fabricação de argamassas de reabilitação, como único ligante, em execução de rebocos exteriores sobre suportes antigos.

Em diferentes utilizações de engenharia civil, tais como, tratamento de solos.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Características Físicas	Valor	Norma
Cor	Beje	-
Baridade (kg/dm³)	0,65 ± 0,05	EN 459-1
Densidade (g/cm³)	2,7	-
Finura %	90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 5,0	EN 459-1
Blaine (cm²/g)	9400	-
Expansibilidade método alternativo (mm)	≤ 2,0	EN 459-1
Água livre (%)	≤ 2,0	EN 459-1
Teor de ar (%)	≤ 5	EN 459-1
Penetração (mm)	> 10 e < 50	EN 459-1
Tempo de presa (h)	inicial final > 1,0 ≤ 15,0	EN 459-1
Características Mecânicas	Valor	Norma
Resistência mecânica à compressão 7 dias (MPa)	≥ 2,0	EN 459-1
Resistência mecânica à compressão 28 dias (MPa)	≥ 5,0 e ≤ 15	EN 459-1
Características Químicas	Valor	Norma
Sulfato (SO ₃) (%)	≤ 2,00	EN 459-1
Cal disponível (Ca(OH) ₂) (%)	≥ 15,00	EN 459-1

4. FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS

A dosagem de **Secil NATURAL LIME NHL 5** numa argamassa deve adequar-se ao fim a que se destina. Nas argamassas de reboco e de assentamento, a **Secil NATURAL LIME NHL 5**, tem um papel preponderante como único ligante ou conjugado com outros.

Misturar previamente a **Secil NATURAL LIME NHL 5** com o agregado e posteriormente adicionar água na quantidade adequada de forma a obter uma boa trabalhabilidade.

Para efeitos orientativos, relativamente ao traço a utilizar, aconselhamos a consulta da Tabela no ponto 5.

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmartinganca.pt



1/3
www.secilmartinganca.pt

Secil NATURAL LIME NHL5

NHL 5 - CAL HIDRÁULICA NATURAL



Fábrica de Cal



Filtros de Mangas



Pedra Cozida

Conselhos complementares

- ▶ O excesso de água de amassadura é prejudicial às características físicas do reboco;
- ▶ Deve ser sempre utilizada a quantidade mínima de água que permita boa trabalhabilidade;
- ▶ A água de amassadura deve estar isenta de quaisquer impurezas (argilas, matéria orgânica), devendo, de preferência, ser utilizada água potável;
- ▶ Uma vez determinado o traço a utilizar para uma argamassa, manter as dosagens constantes e o tempo de amassadura.

Restrições

Não aplicar argamassas a temperaturas inferiores a 5° C e superiores a 30° C, evitando a aplicação em situações de elevada exposição solar e/ou sob ventos fortes.

Não utilizar argamassas amolentadas ou que tenham iniciado a sua presa.

Evitar a secagem rápida das argamassas, regando o suporte, 1 a 2 horas antes da aplicação e voltando a regar logo que a argamassa se apresente suficientemente resistente. Repetir a rega 1, 2 e 7 dias depois.

6. TRATAMENTO DE SOLOS

A adição de **Secil NATURAL LIME NHL 5** a certos solos argilosos e húmidos permite a sua estabilização, melhorando a sua resistência, pela diminuição do índice de plasticidade e de uma maior compactação, a qual permite um aumento do CBR (California Bearing Ratio, índice de capacidade de suporte).

A adição de **Secil NATURAL LIME NHL 5** reduz a humidade do solo contribuindo para a aglutinação das suas partículas e constituindo um aglomerado muito mais compacto.

5. TRAÇOS RECOMENDADOS

Traços de Argamassa Recomendados	Matérias primas (volume)			Resistência à compressão (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa) 28 dias
	NHL 5	Areia fina (< 1,2 mm)	Areia de rio (< 4,0 mm)	7 dias	28 dias	
Argamassa de alvenaria (areia:ligante) = (2:1)	1,0	1,0	1,0	1,8	3,4	10100
Argamassa de reboco (areia:ligante) = (3:1)	1,0	1,5	1,5	0,5	1,3	5700
Argamassa de reboco (areia:ligante) = (4:1)	1,0	2,0	2,0	0,4	0,5	3100
Argamassa de betonilha (areia:ligante) = (3:1)	1,0	-	3,0	1,0	1,8	8300

Obs: Estes valores são apenas orientativos, obtidos em ensaios de laboratório. A utilização de agregados de diferentes origens ou características devem ser previamente ensaiados

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmartinganca.pt



2/3

www.secilmartinganca.pt

Secil NATURAL LIME NHL5

NHL 5 - CAL HIDRÁULICA NATURAL

Processo de aplicação

A quantidade de **Secil NATURAL LIME NHL 5** a utilizar deve ser de 0,5 a 5 % (sendo 3% o valor típico) da massa de solo a tratar, de onde devem ser retiradas as pedras de grandes dimensões.

De seguida, espalhar a **Secil NATURAL LIME NHL 5**, misturando-a e homogeneizando-a com o solo em tratamento. Depois, compactar o solo tratado, que ficará muito mais resistente à penetração das águas pluviais e mais apto a funcionar como base de fundações.

Estes procedimentos encontram-se documentados em suporte vídeo disponibilizado em www.secilmartinganca.pt. Também poderá solicitar-se cópia aos nossos Serviços Comerciais.

7. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- Provoca irritação da pele;
- Provoca danos graves nos olhos;
- Pode provocar irritação respiratória;
- Manter fora do alcance das crianças;
- Usar luvas de proteção/ vestuário de proteção/ proteção ocular/ proteção facial;
- Evitar respirar poeiras/ vapores.

8. EMBALAGEM E VALIDADE

Embalagem

- Sacos de papel de 25 kg em paletes plastificados
- Granel para sistema de silo



Validade

12 meses desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem originais e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e de humidade.

Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance não nos responsabilizamos pela sua incorrecta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.

Revisão de Dezembro de 2011
TC.E.077.1



DESIGNAÇÃO: **Secil NATURAL LIME NHL 5**

NORMA DE REFERÊNCIA: EN 459-1:2010

ANO: 11

UTILIZAÇÃO PREVISTA: Preparação de ligante para argamassas, produção de outros produtos da construção e utilizações em engenharia civil.

Cal Hidráulica Natural - NHL 5

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmartinganca.pt



3/3

www.secilmartinganca.pt